

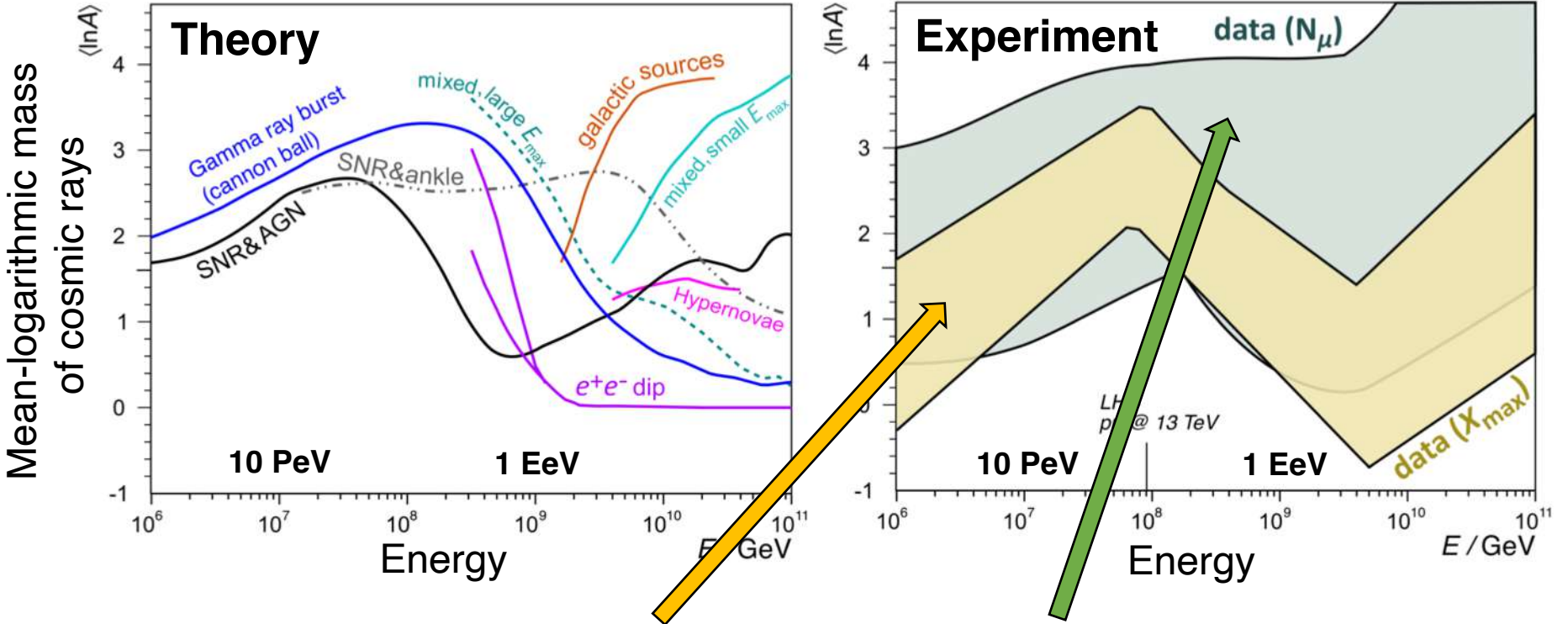
天地同時 宇宙線シャワー観測法の提案

岡 知彦
(立命館大学)

極高エネルギー宇宙線の元素組成

宇宙線起源の解明において、元素組成の測定は極めて重要
ただし、PeVを越える宇宙線の測定では大きな不定性

[Albrecht+2022; Kampert+2012]



主に、空気シャワーの 縦方向発達 (X_{max}) や ミュオン数 (N_{μ}) を用いて推定

→ 両者の結果に食い違い「Muon Puzzle」

> PeV帯域でのハドロン相互作用モデルの不定性に起因？

第三の矢: Direct Cherenkov法

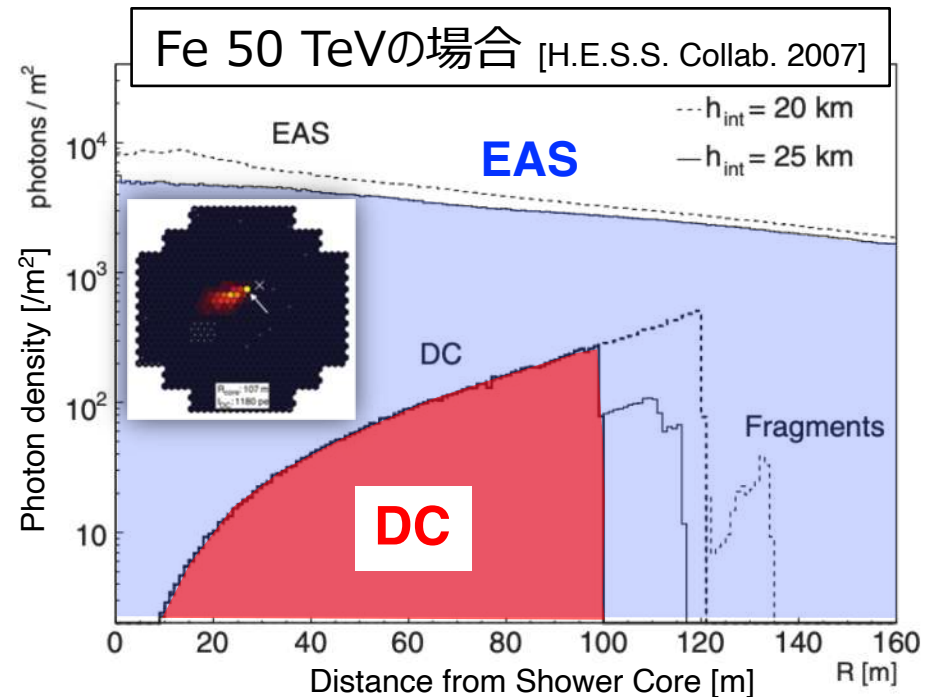
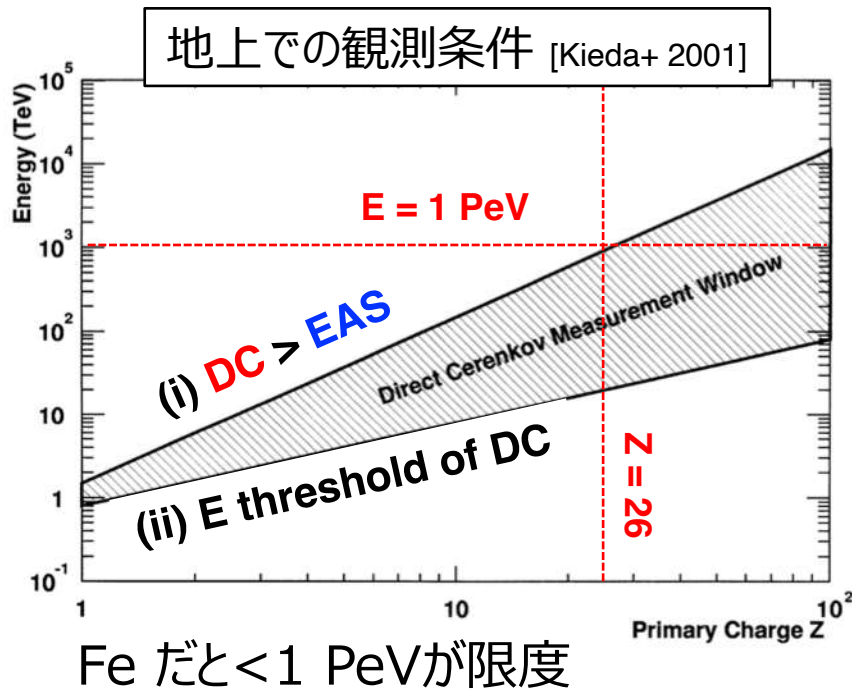
☑ Cherenkov光量 ∝ 荷電粒子の原子番号の2乗

$$N_{ph} = 2\pi \boxed{Z^2} \alpha l \cdot \left(\frac{1}{\lambda_{min}} - \frac{1}{\lambda_{max}} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right)$$

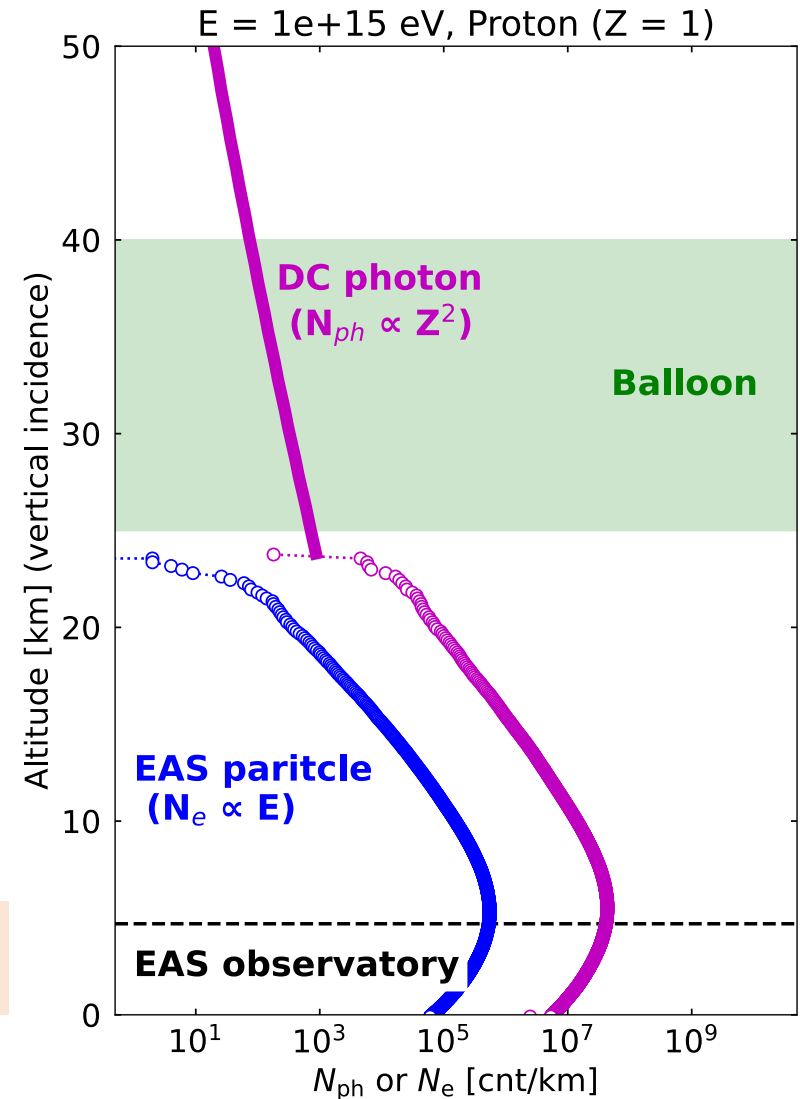
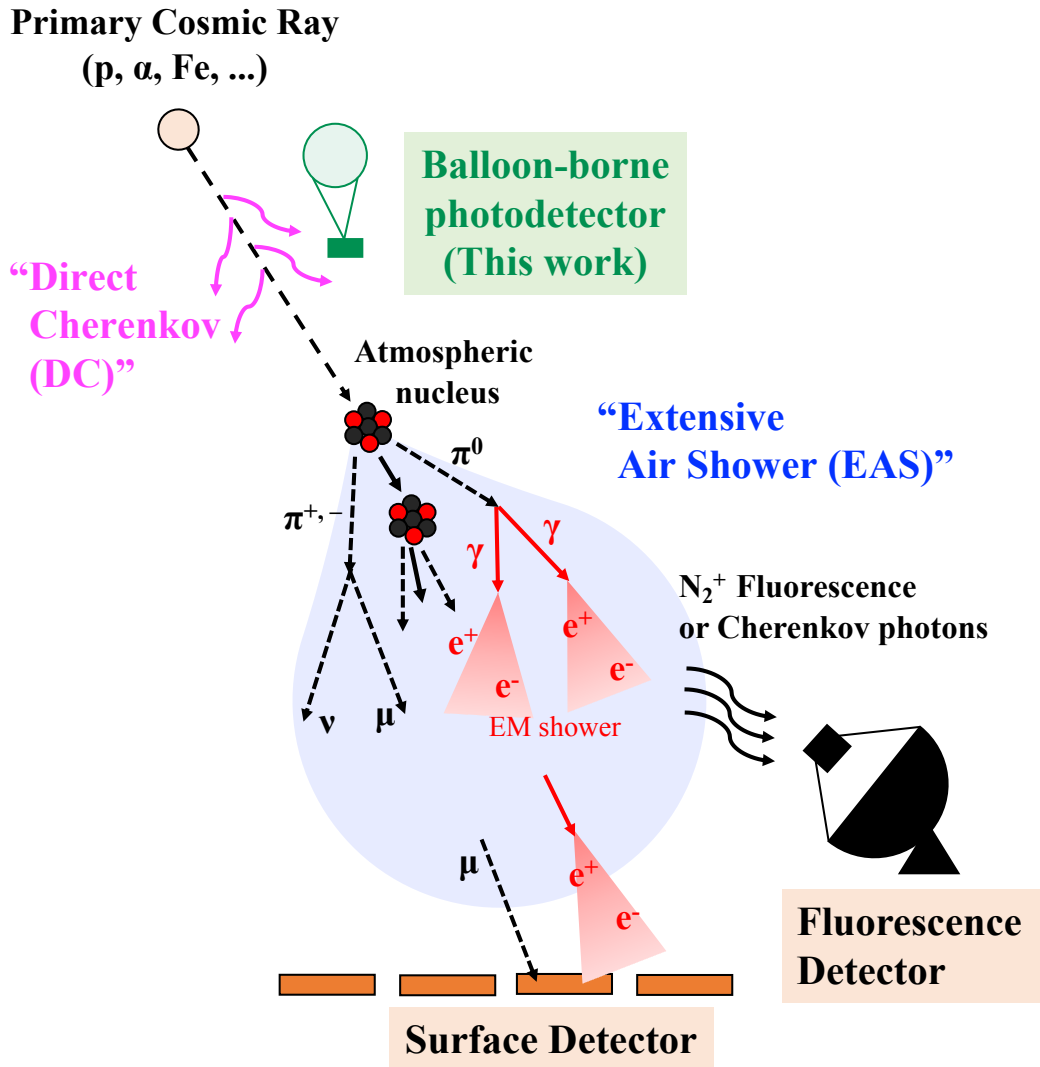
Step size
Wavelength
Refractive index

**1次宇宙線からのチェレンコフ光 “Direct Cherenkov (DC)” が測定できれば
元素組成が精密に推定できる**

☑ 地上観測では空気シャワー(EAS)からのCherenkov光に埋れ観測が難しい



本研究の構想: 「気球-地上の同時観測」



気球 (DC光) + 地上 (EAS) の同一シャワーの同時観測の実現を目指す

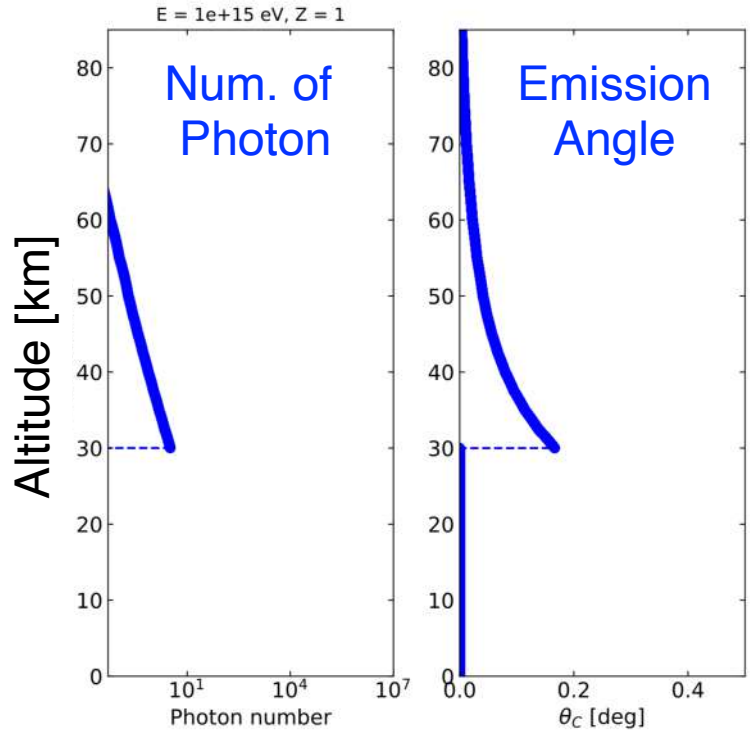
DC光の横方向広がり

協力: 藤田慧太郎氏 (ICRR)

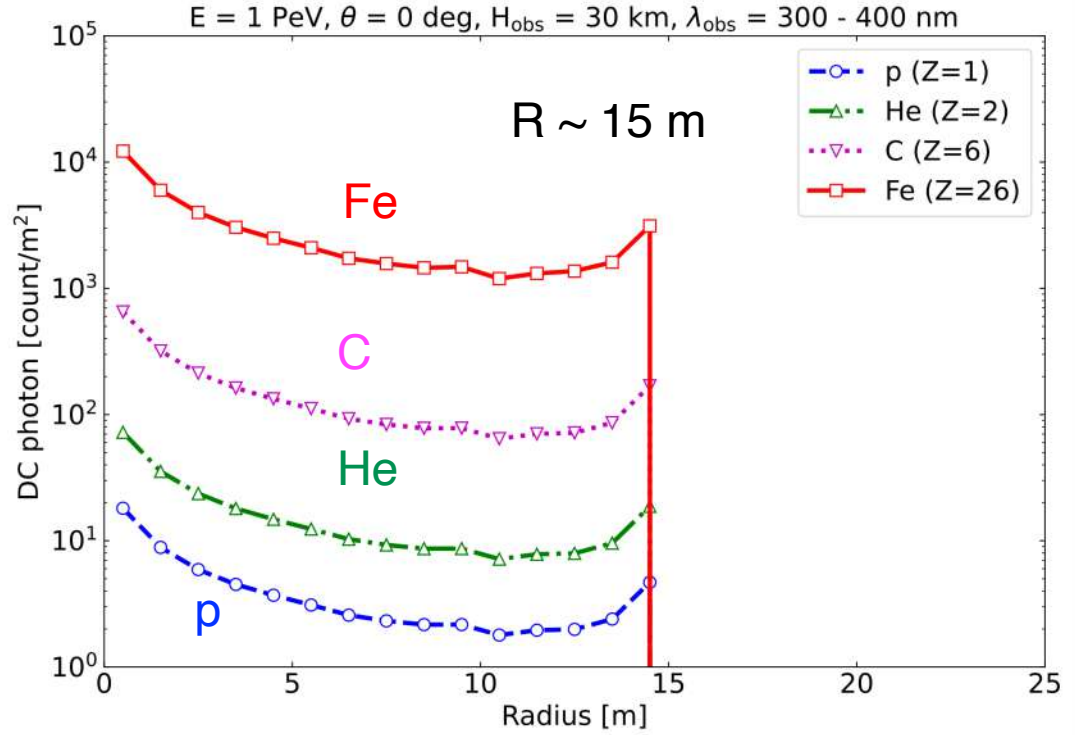
計算の仮定

- 観測高度 = 30 km (1st interaction point の高度より上とする)
- 標準大気モデル (U.S. standard atmosphere, 1976) を採用
- 大気の散乱・吸収は未考慮

高度変化 (1 PeV, Z = 1, $\theta=0^\circ$)



DC光量の横方向広がり分布



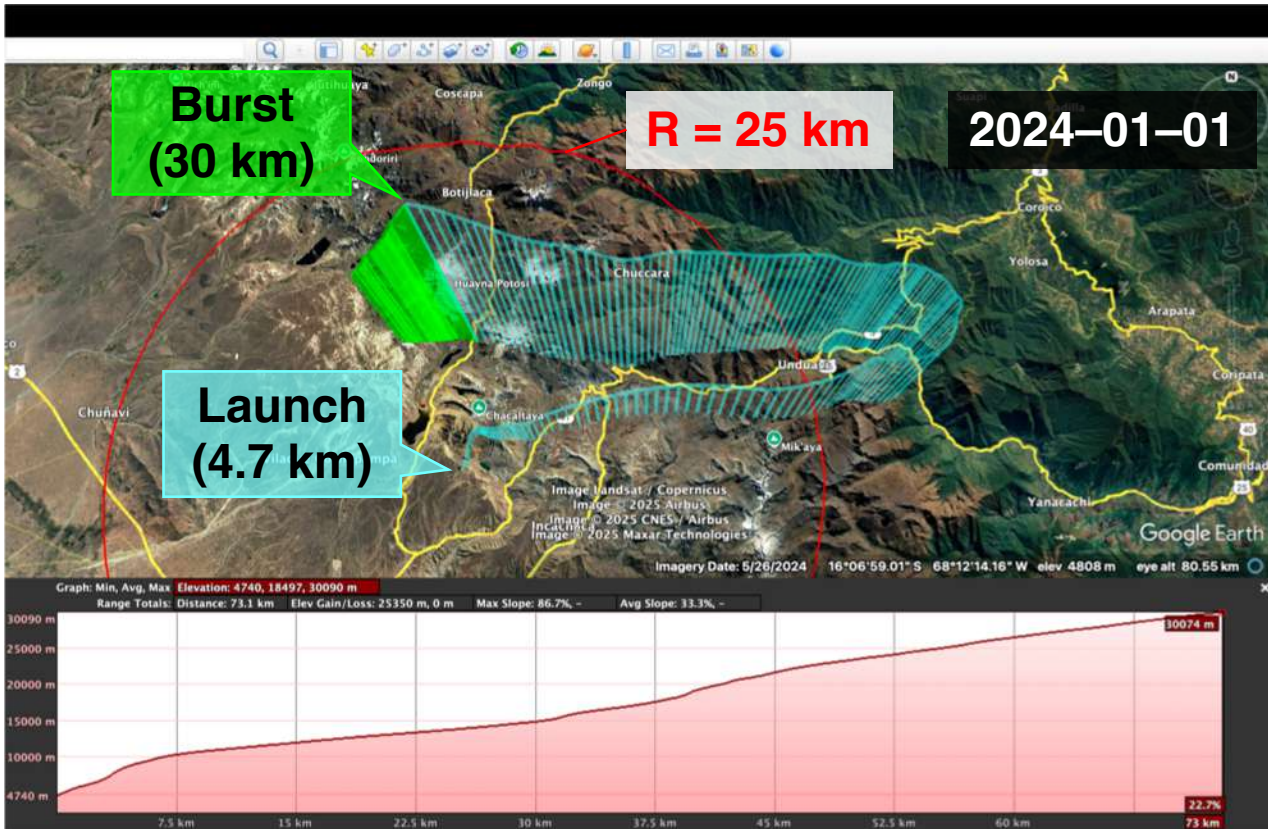
30 km高度では半径~15 mに広がる (R~20 m@25 km)
 → その半径以内で光観測ができれば、Zが推定可能

気球経路シミュレーション

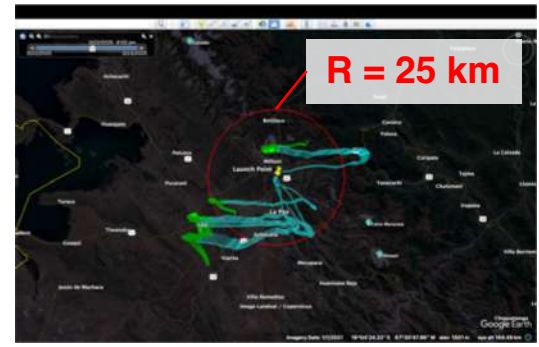
気球が実験サイト上空を漂う必要がある

→ ALPACA実験サイト (4740 m a.s.l., 16° 23'S, 68° 08'W) を例に検討

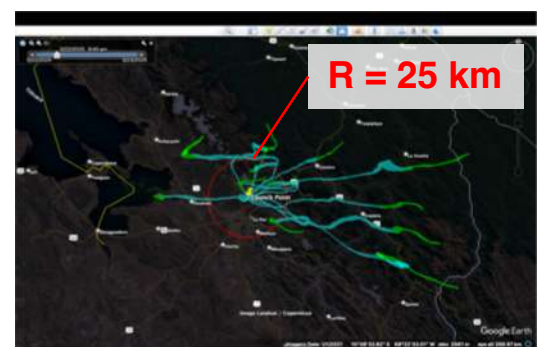
- 経路シミュレーション: NOAA GML/OZVW Software Balloon Prediction (Global Monitoring Laboratory)
- 描画ツール: Google Earth Pro



2024.01.01-01.05



2024.01.01-12.01

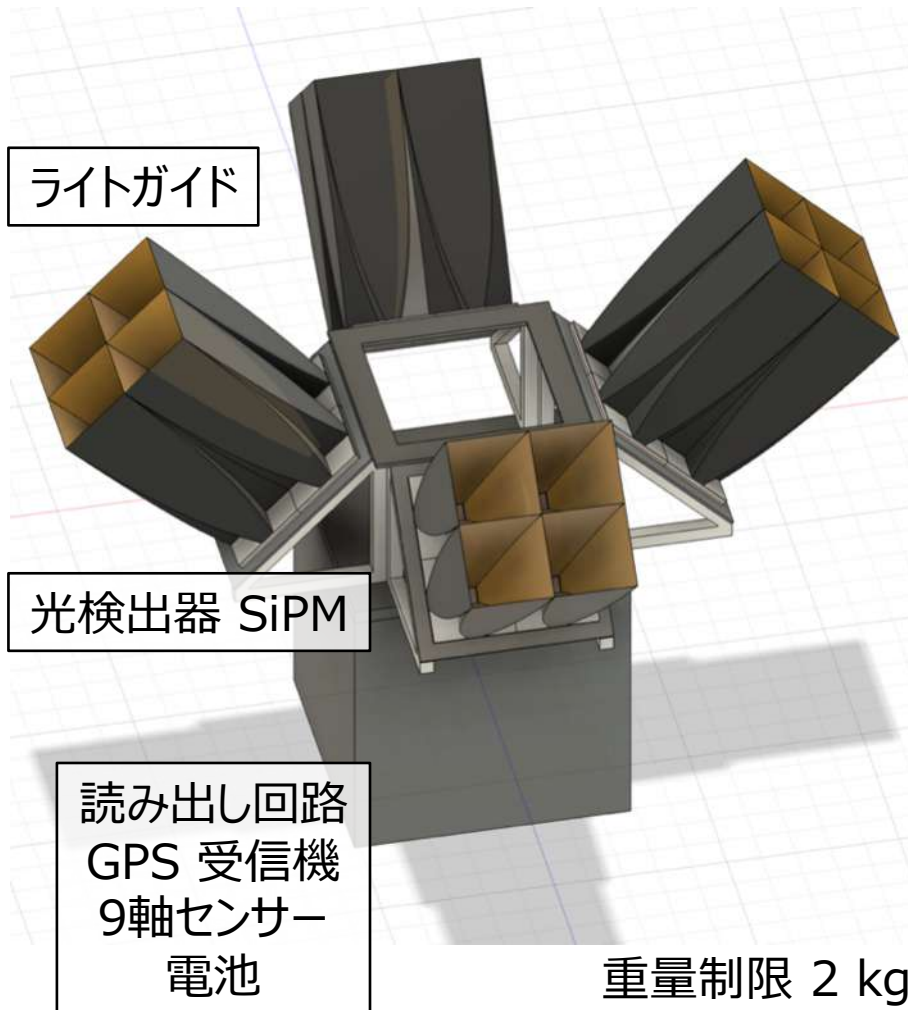


☑ 風向きは日々刻々と変化。検出器上空に戻る風は存在しそう。

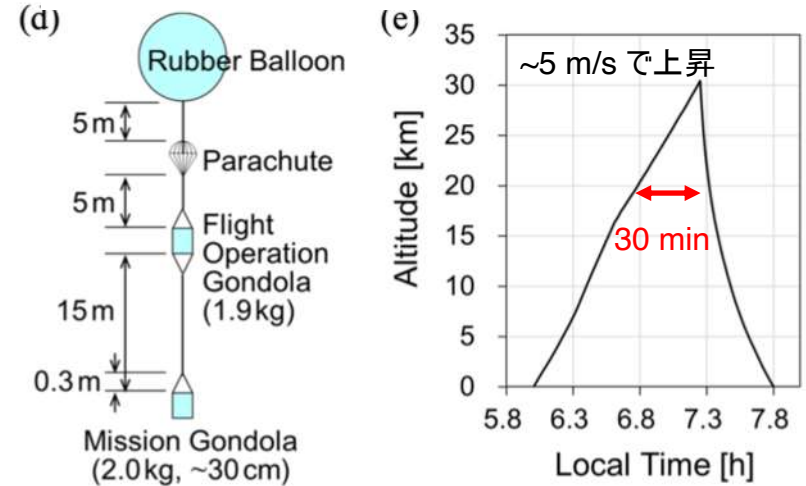
検出器のコンセプト

放球機会が得やすい小型気球に搭載可能な大面積 & 軽量な光検出器

本研究の気球システムの構成イメージ図

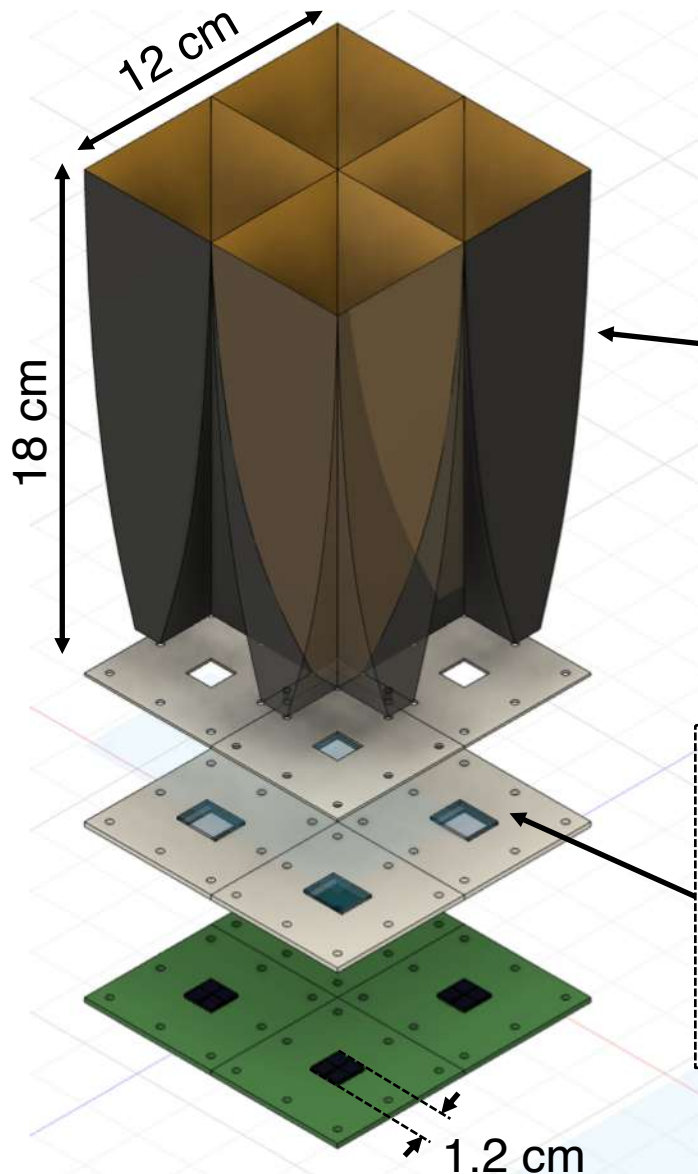


ゴム気球の高度変化の例 [Fuke+2023]



自動放球システムの検討
(VAISALA AUTOSONDE AS41)

光検出器モジュール

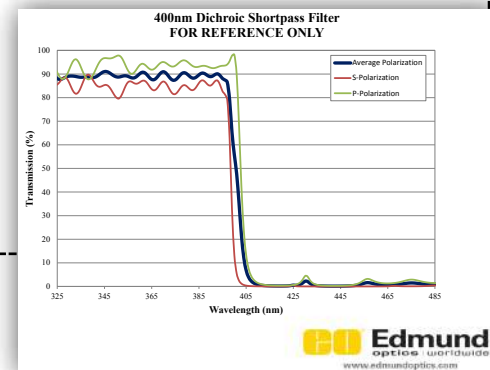


ライトガイド

- ☑ プラスチック+反射材を用いて集光系を設計しシステムの軽量化を実現 (例: CTA × 東海光学)
- ☑ 反射材としてアルミ蒸着PETを採用予定 300 nmでも反射率 >50%
- ☑ 形状: Okumura Cone [Okumura+12] を採用 ROBAST [Okumura+16] を用いて検討中

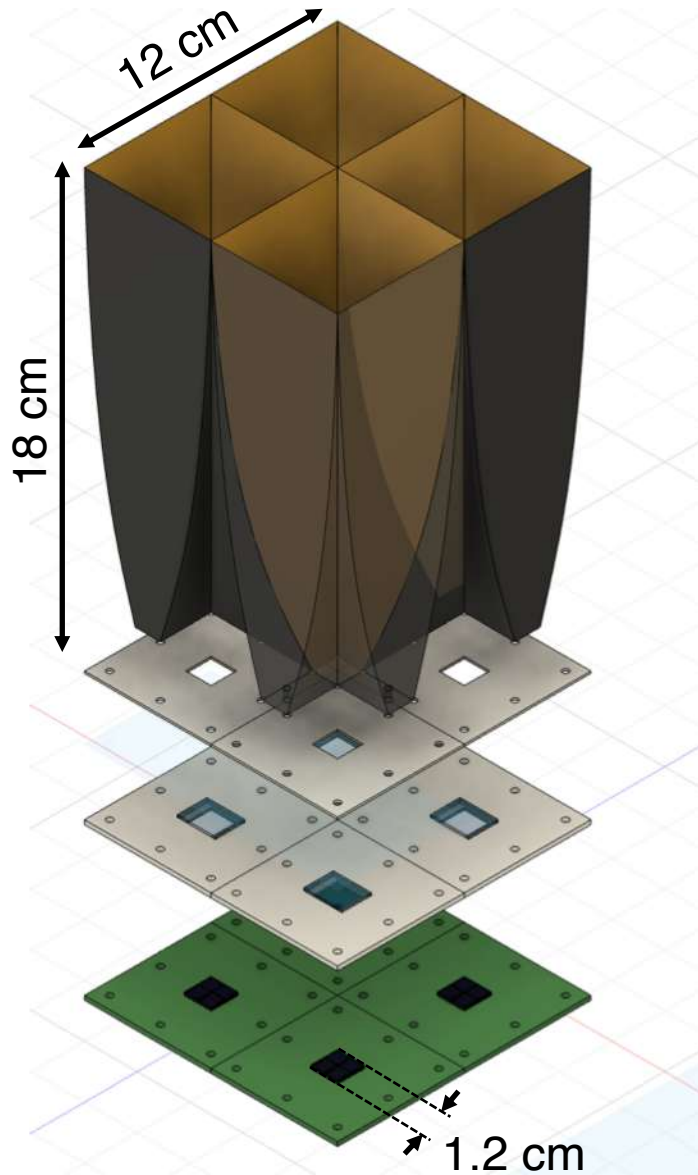
ショートパスフィルター

- ☑ EO EDMUND社
- ☑ 12.5 mm × 17.6 mm (厚み 1.05 mm)
- ☑ <400 nm を透過



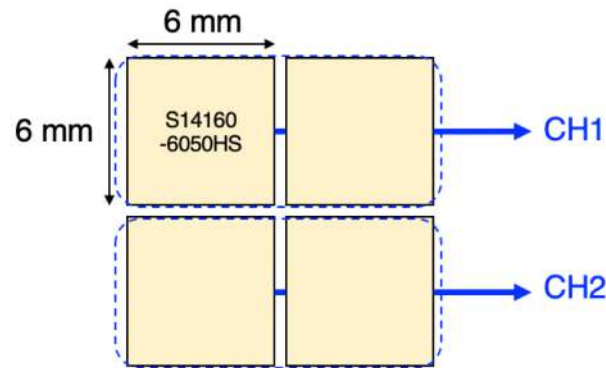
光検出器モジュール

協力: 辻直希氏 (京都大)



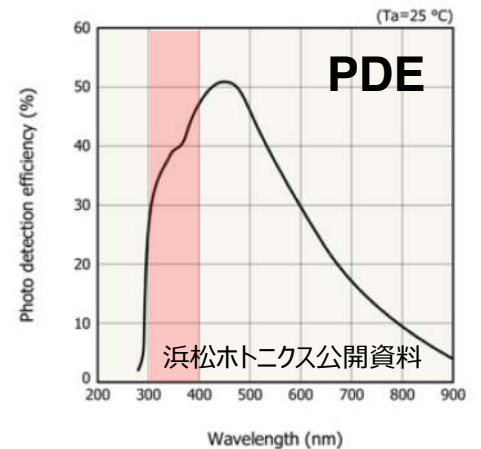
MPPC

- ☑ LG1本あたり、6 mm角チップを4枚並べて使用
 - 2 chip 直列読み出しで読み出し数軽減



チャンネル間で
コインシデンスを取り
雑音の抑制

- ☑ S13360-6050/S14160-6050
 - 検出効率: 30-50%
@300-400 nm
 - S14シリーズの方が典型的に安価だが、暗電流が大きい



光読み出し回路 + 気球システム

MPPC読み出し回路 協力: 辻直希氏、寺内健太氏 (京都大)、国分紀秀氏 (ISAS)

☑ 8 Ch/面 x 4面 = 32 Ch読み出し

☑ サンプル周波数: ~10 MHz (NSB量 & シャワーアレイとの同期を元に検討)

→ **MomoTarO (/PENGUIN) ボードの採用を検討**

- 1ボードでMPPC信号8 Ch処理可能
- 動作電圧: 5V (消費電力: ~3W/ボード)
- Sony Spresense を用いた制御
- GPSアンテナの拡張が可能

フロントエンドボード

FPGAボード



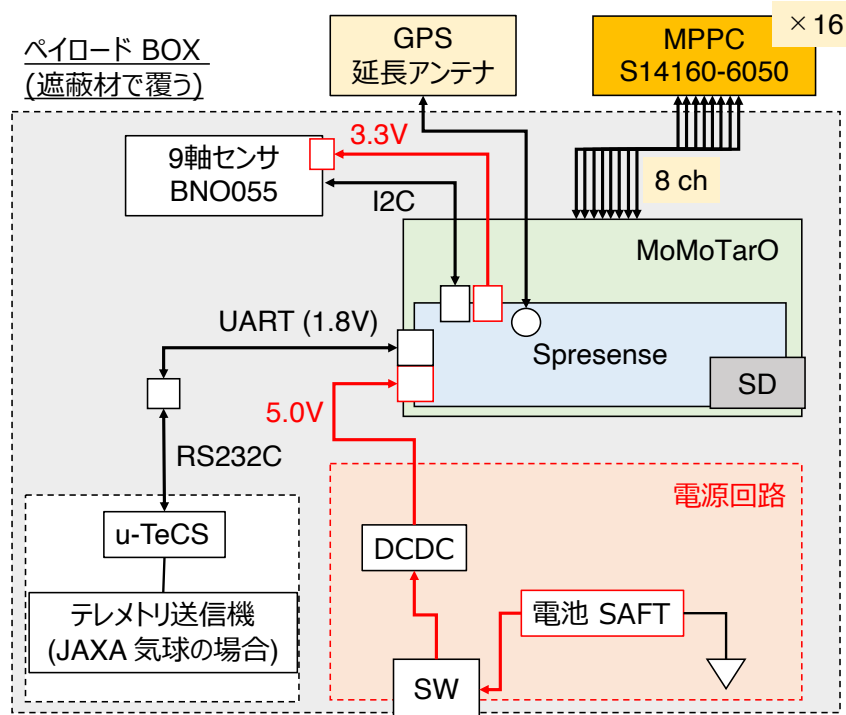
~50 g
(1ボード)

☑ **9軸センサー: BNO055**

- Bosch Sensortec社
- モジュール化したもの
(共立プロダクツ)



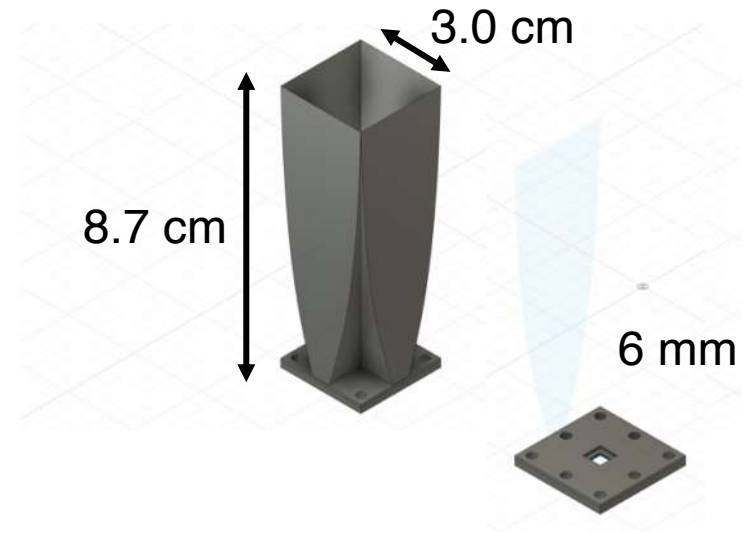
ペイロード結線図



プロトタイプ開発

協力: 辻直希氏、寺内健太氏 (京都大)

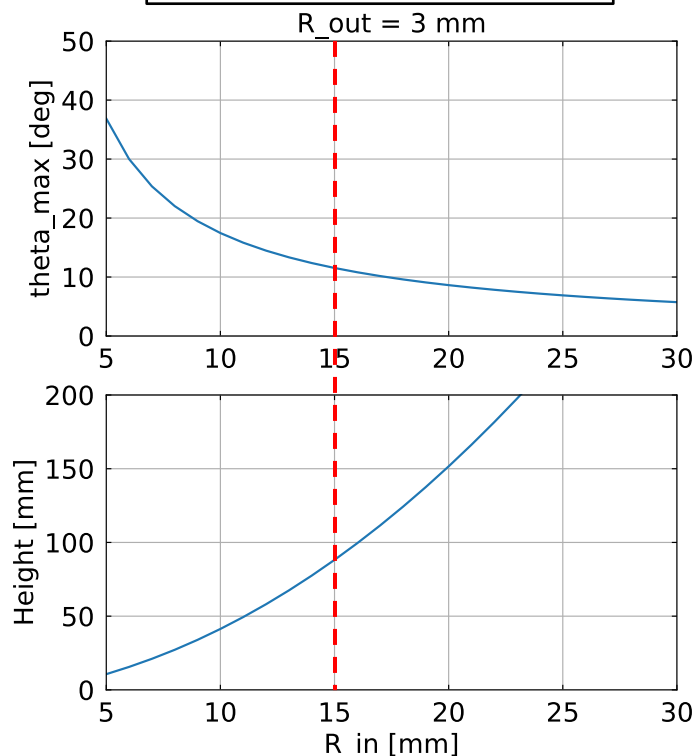
- ☑ 最小な構成要素だけで動くものを作り、実験システムの全容を掴む
- ☑ 小目標:
 - ライトガイドの作り方のノウハウの蓄積
 - 反射率測定方法の確立
 - 反射材の選定
- ☑ MPPC について
S14160-6050HS 1 chip を利用
→ 6 mm角MPPC用の治具を作成
- ☑ 読み出し回路: PENGUIN
 - 榎戸氏 (京都大) が教育用に開発
 - MomoTarOボードに似た仕様
 - MPPC 2 Ch 読み出し可能
- ☑ 3Dプリンター:
Flashforge Guider II S (精度 0.127 mm)
材質: PLA



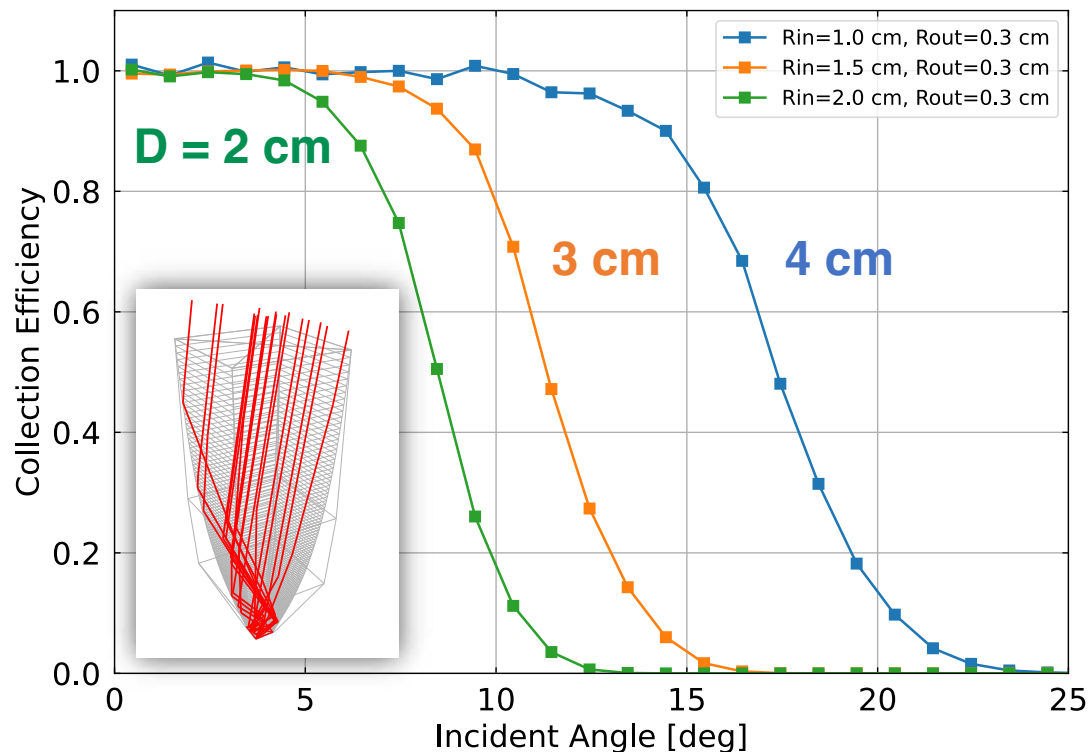
プロトタイプ開発：ライトガイド形状の最適化

- ☑ MPPC サイズ (6 mm角) から Winston Cone のパラメータを算出
→ 入り口のサイズを与えれば、Coneの視野と高さが決まる [Winston, 1970]
- ☑ ROBAST [Okumura+2016] を用いて集光効率を評価; 形状: Okumura Cone

Cone の視野と高さ

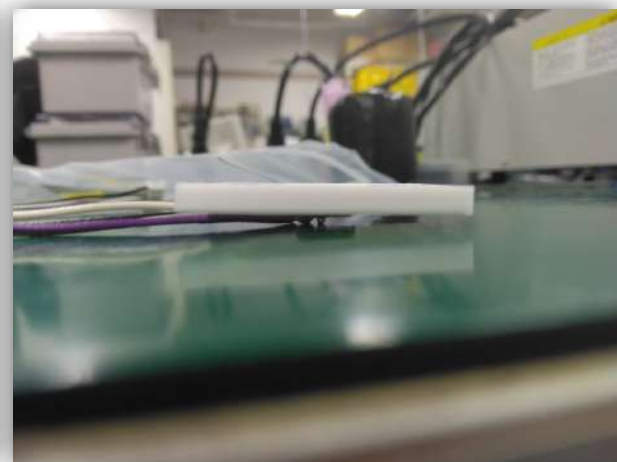
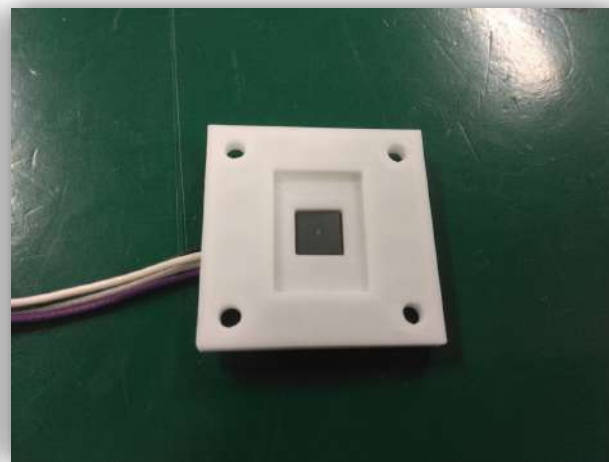
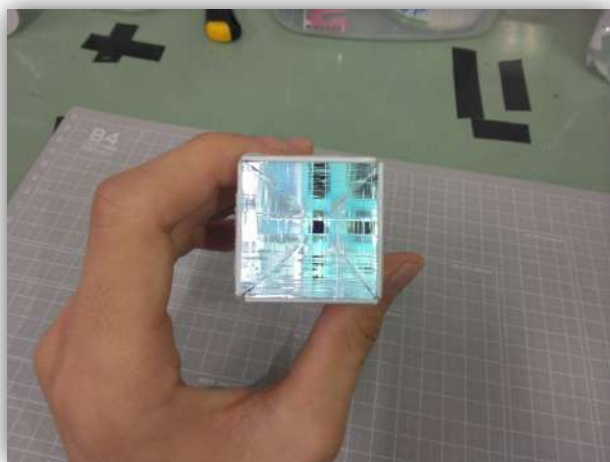
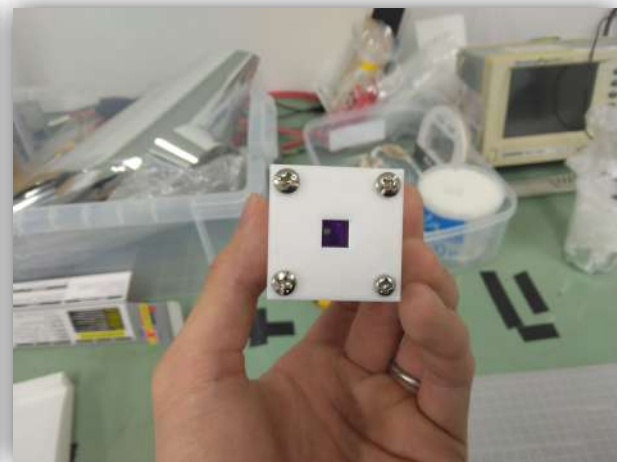
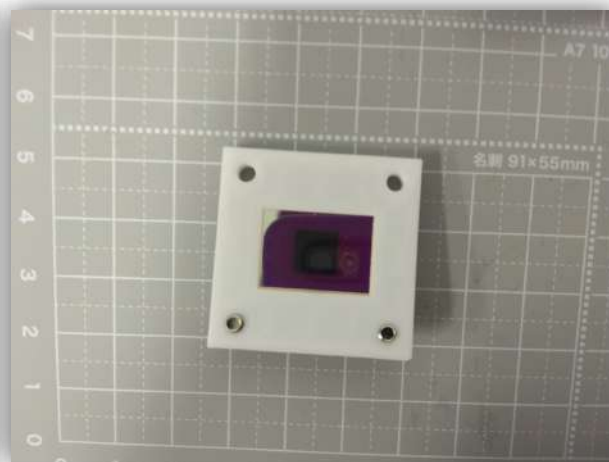
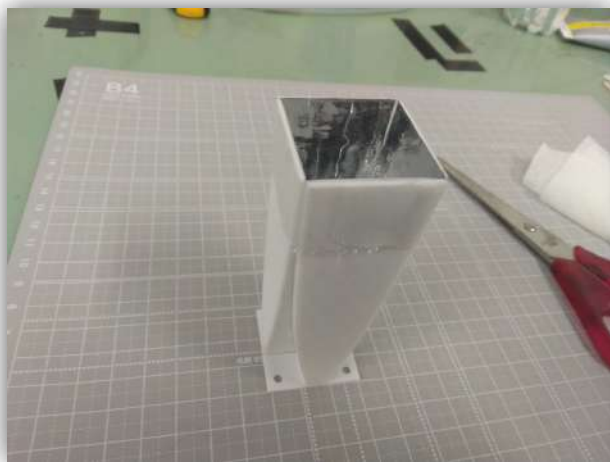


ライトガイド収集効率の入射角依存性



視野10度 & 高さの観点から入り口サイズ 3 cm角を採用 → 本番は2倍のサイズ

ライトガイド & フィルターケース開発



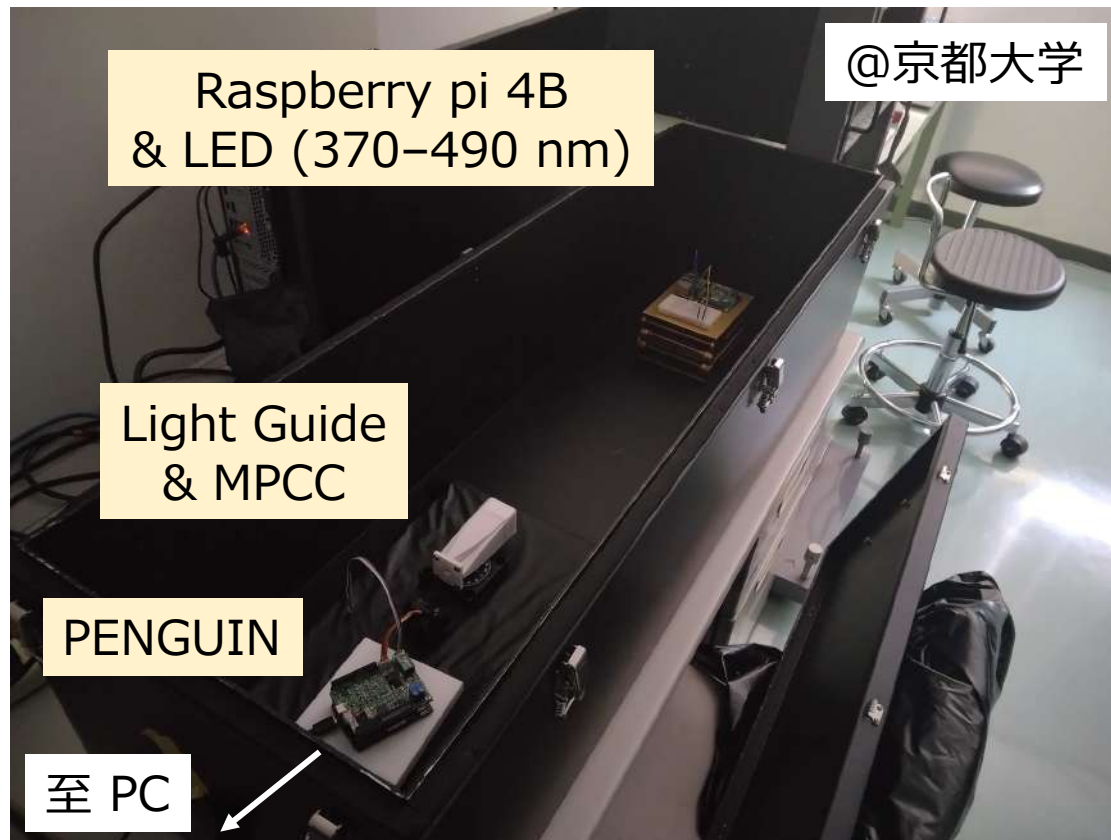
現状、MPPCは下からテープで貼り付けて固定
→ 4 チップ並べる時は基板の余白を作って基板ごとねじ止め

プロトタイプ開発: LED試験

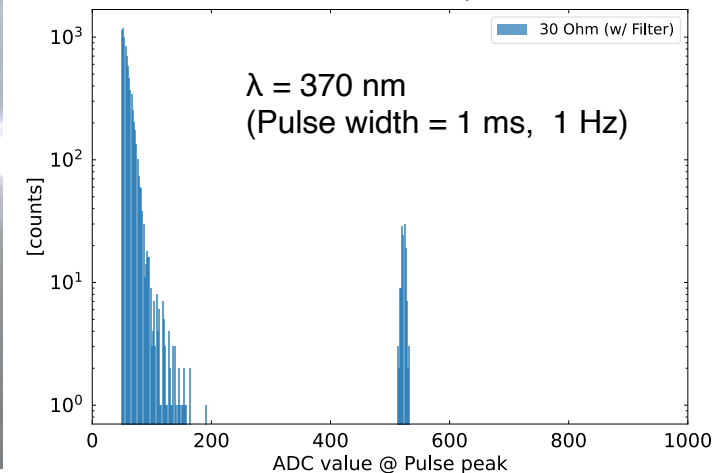
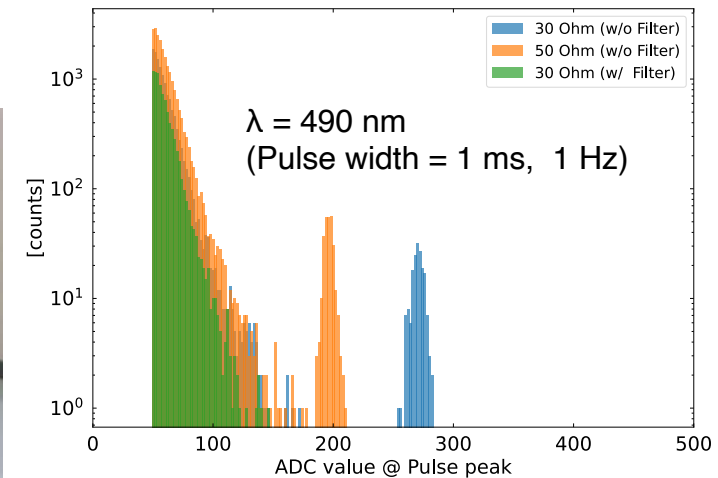
協力: 寺内健太氏 (京都大)

☑ LED光源を用いた試験 (構築中)

実験セットアップ



ADC ピーク分布



☑ 擬似平行光を用いた試験が行えるように3Dプリンターでコリメータ治具設計中
今後、入射角依存性などライトガイド性能の評価

予想検出事象数の概算

宇宙線スペクトル [e.g., Dermer, 1986]

$$J_{\text{CR}} = 2.2(E/\text{GeV})^{-2.75} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{GeV}^{-1}\text{sr}^{-1},$$

ライトガイド1面分の立体角 (地上-気球との同時事象をとるため; 視野10度)

$$\Omega [\text{sr}] = 4 \arcsin(\sin\alpha \cdot \sin\beta) \sim 0.12$$

チレンコフ光は半径15 mの円に広がる (@30 km高度)

→ その中に気球があれば100%検出できると仮定

$$A_{\text{eff}} \sim (15 \text{ m})^2 \times \pi \sim 7.1 \times 10^6 [\text{cm}^2]$$

ゴム気球一回あたり >25 km で
浮遊できる時間を30分とする

予想検出事象数

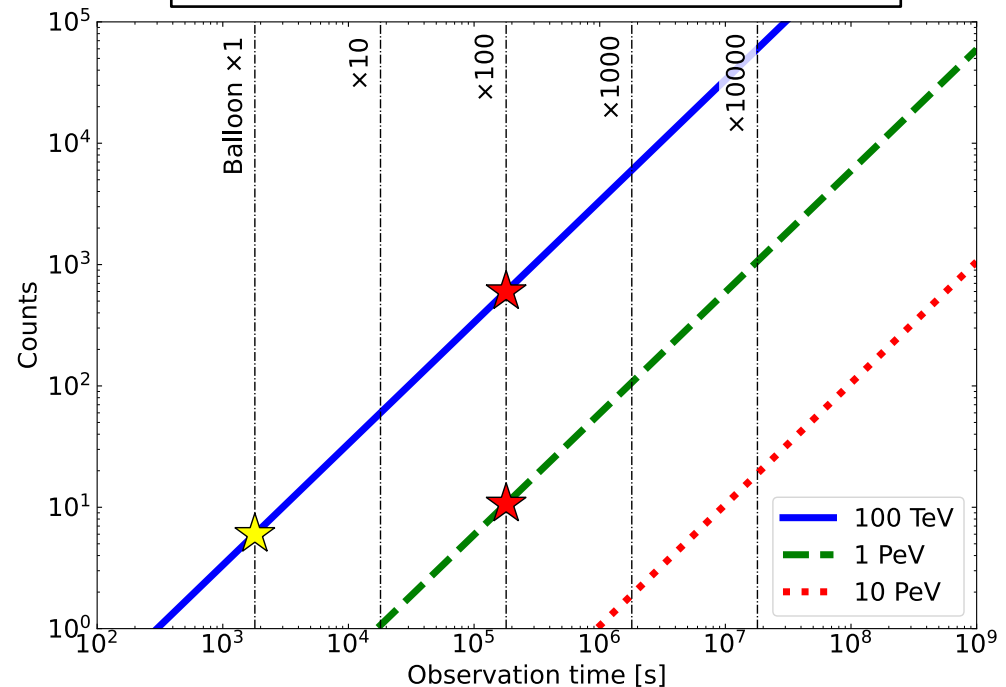
~ 20.2 [cnts/balloon] @ 50 TeV

~ 6.0 [cnts/balloon] @ 100 TeV

~ 0.4 [cnts/balloon] @ 500 TeV

(* proton が多いと検出効率 小)

観測時間 vs 予想検出事象数



実験目標とタイムライン

- ① **天地同時宇宙線シャワー観測のシミュレーション検証 - FY2025**
 - EAS からのチェレンコフ光も組み合わせた議論 & 必要な観測条件の評価
 - ② **ゴム気球に搭載可能な軽量大面積光検出器の開発 - FY2025-2026**
 - Ray-Tracing (ROBAST) シミュレーションに基づくライトガイドの最適化 & 開発
 - 大有効面積・低消費電力・短波長感度を持つMPPC光読み出し回路の開発
 - 気球実験用動作システムの開発
 - ③ **ゴム気球観測によるチェレンコフ光の観測技術の実証 - FY2026-2027**
 - 真空試験・噛み合わせ・電波干渉試験 (ISAS/JAXA)
 - ゴム気球実験 (北海道大樹町; JAXA)
- * **ALPACA サイトでの天地同時観測の実証 - FY2027-**
 - 10-100 TeV での宇宙線組成の観測が先行研究と一致するか
- * **Si-PDを用いた気球高度での夜光量の測定 - 2025.06**
 - JAXA小型気球実験 (PI:国分紀秀氏; 相対論検証実験)
 - e.g. <https://jaxa.repo.nii.ac.jp/record/2001207/files/SA6000204006.pdf>
 - において、気球高度での ~ 400 nmの夜光量を測定

