

ミューオン透過法による透視技術と
巨大な物体内部の透視像の撮像
ピラミッドなど考古学遺跡調査への適用

森島邦博

名古屋大学 高等研究院/JSTさきがけ 特任助教

ミューオン透過法の対象

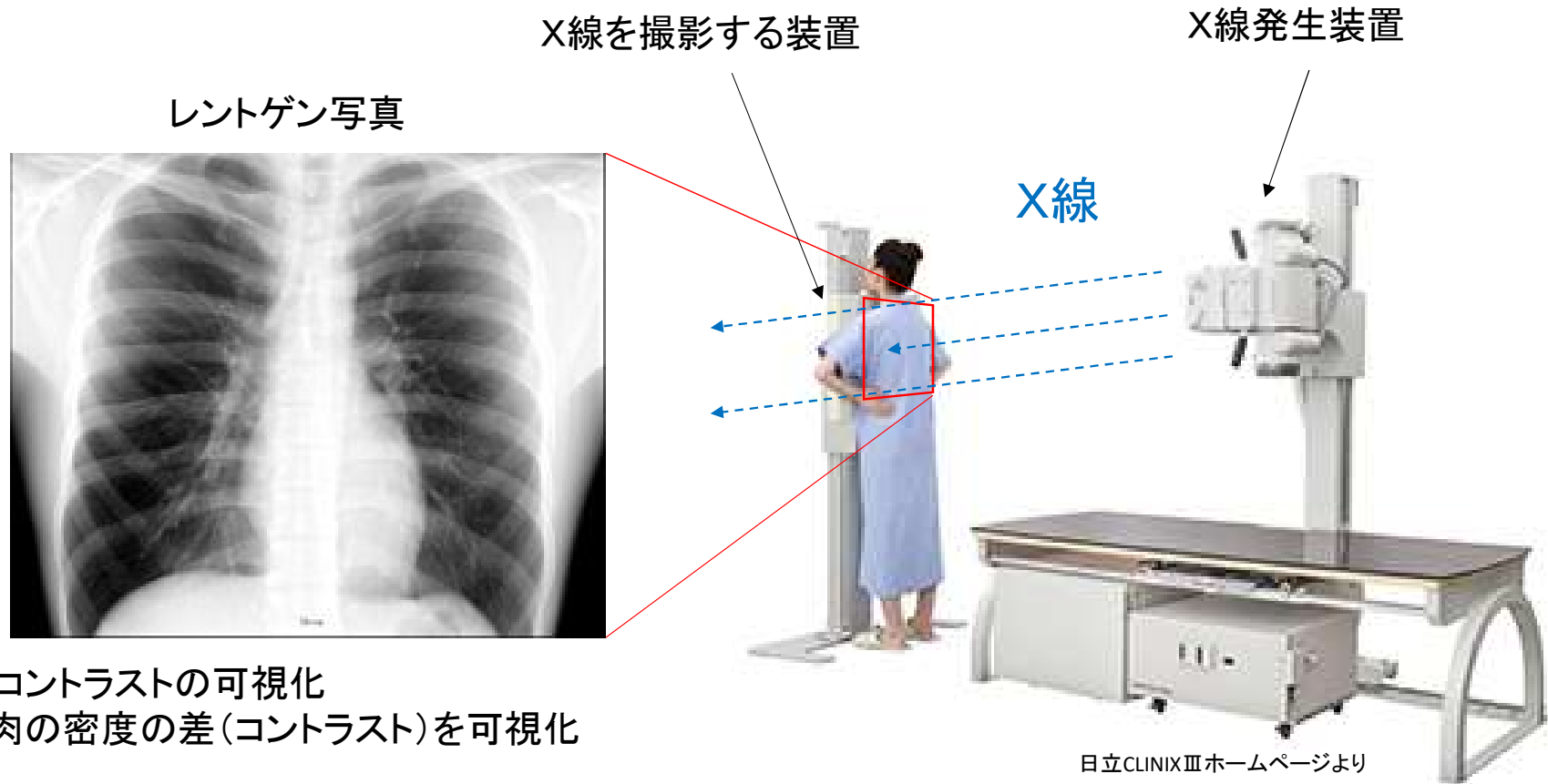


～kmまでの厚さの物体内部の密度コントラストの可視化

X線レントゲン撮影

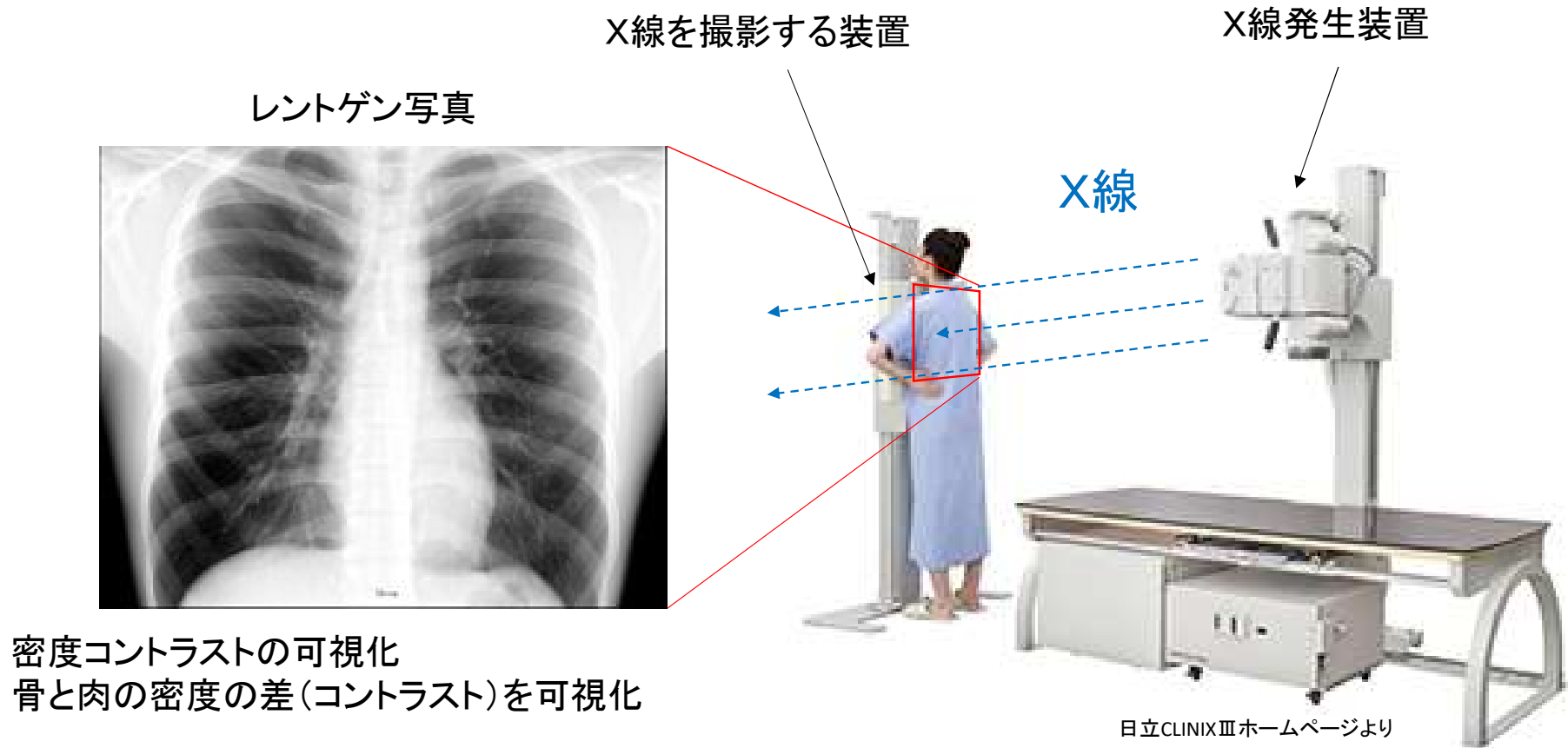


X線レントゲン撮影



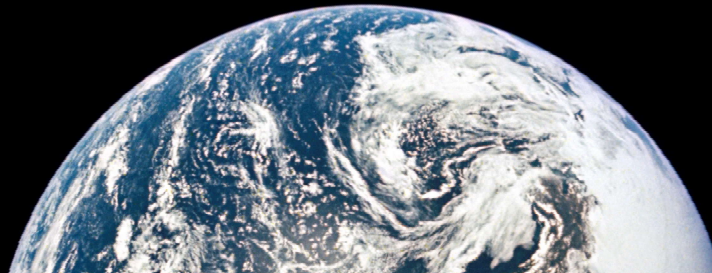
- ・切開せずに体内を透視
- ・正常な状態と比べて異常な状態(骨折、腫瘍など)を探し出す

X線レントゲン撮影



X線は1mくらいで止まってしまう！

宇宙線



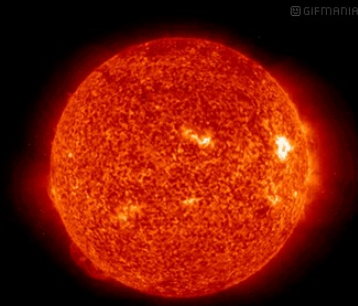
©NASA





宇宙線

恒星(例えば太陽)



NASA, Beth Scupham

超新星爆発

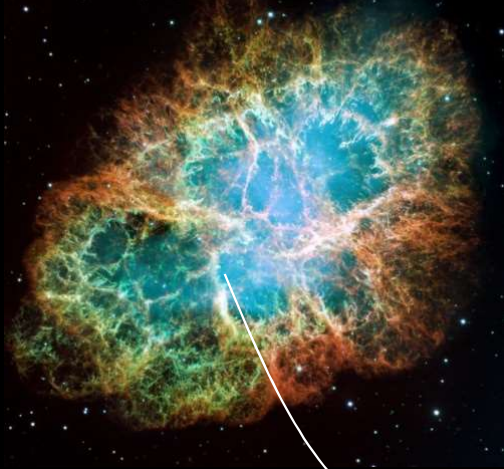
宇宙線



NASA, Beth Scupham

宇宙線

超新星残骸



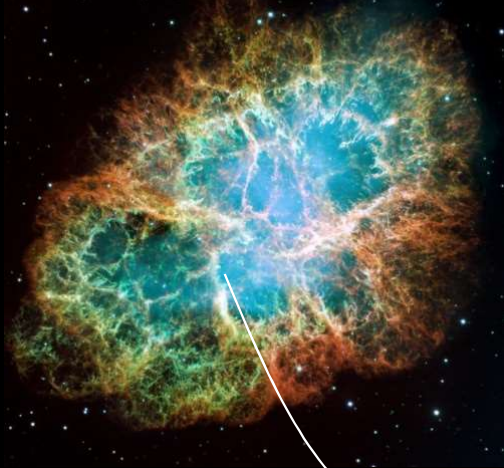
陽子, ヘリウム ...



NASA, Beth Scupham

宇宙線

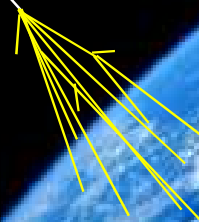
超新星残骸



天然の加速器

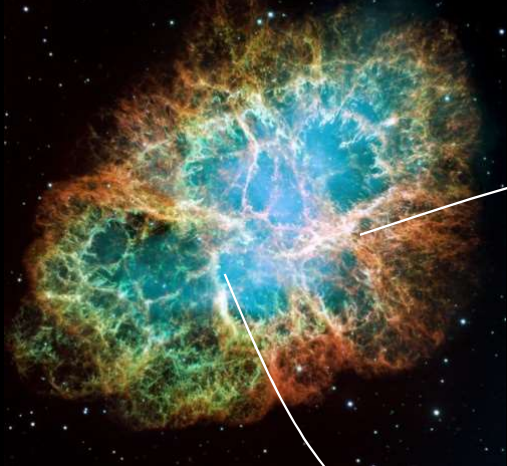
陽子, ヘリウム ...

大気中の原子核
との衝突



宇宙線

超新星残骸



天然の加速器

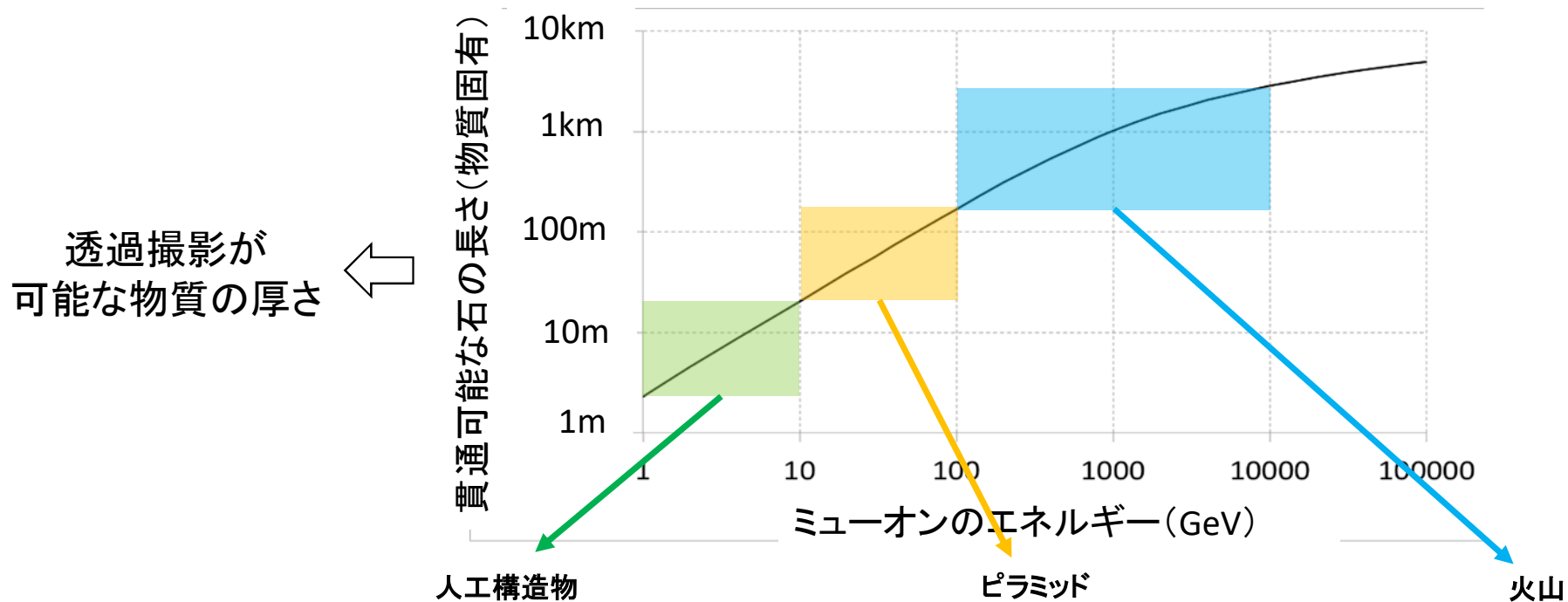
- ・大阪大学やJPARCの加速器ビームライン
- ・高エネルギー陽子

陽子, ヘリウム ...

大気中の原子核
との衝突

- ・大気中の原子核と反応して地上に
ミューオンが降り注ぐ

宇宙線ミュオンはどれくらい物質を通り抜けられるのか？



クフ王のピラミッド

約4500年前に建造

高さ: 147m

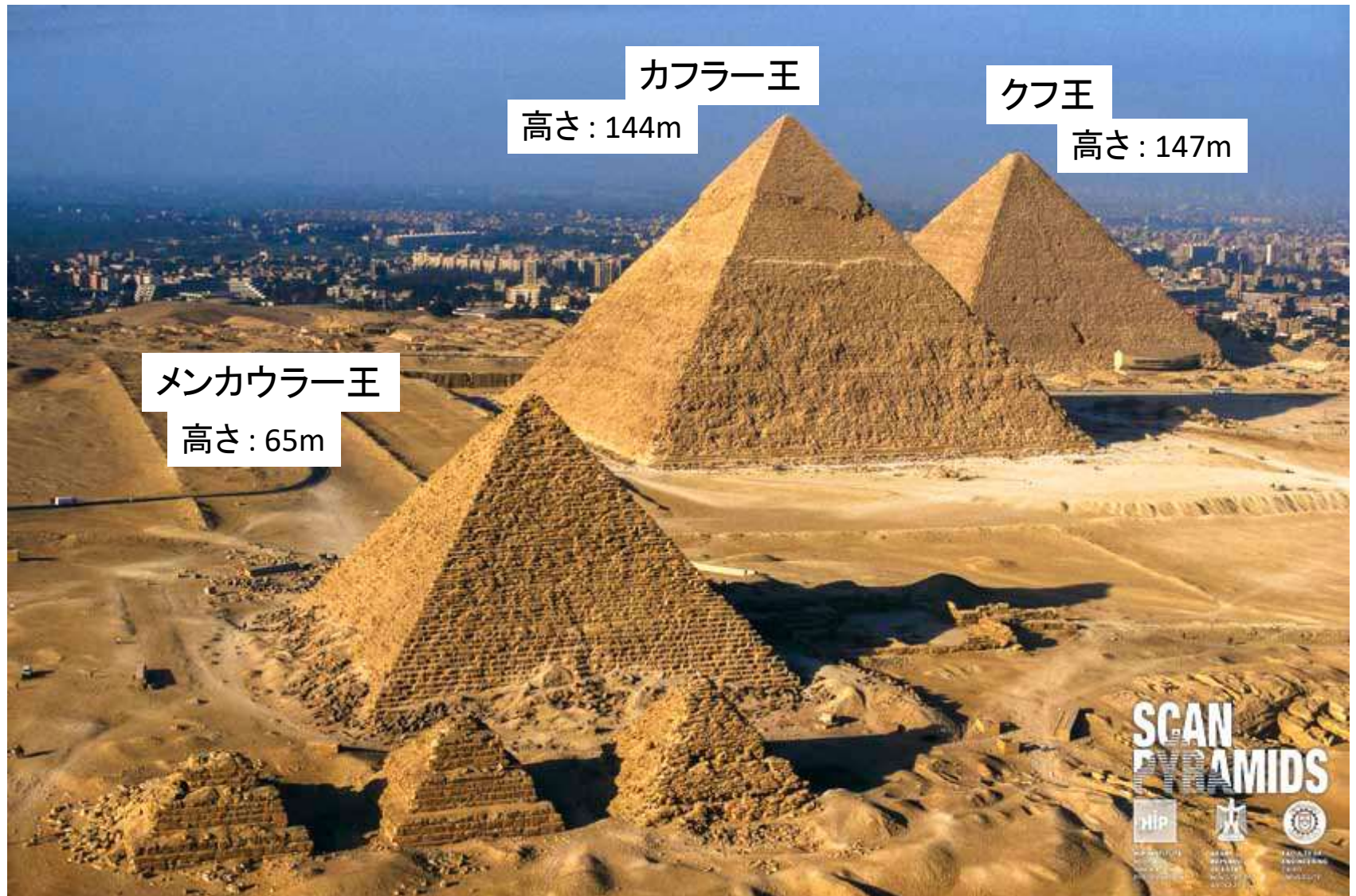
幅: 230m



ギザの3大ピラミッド

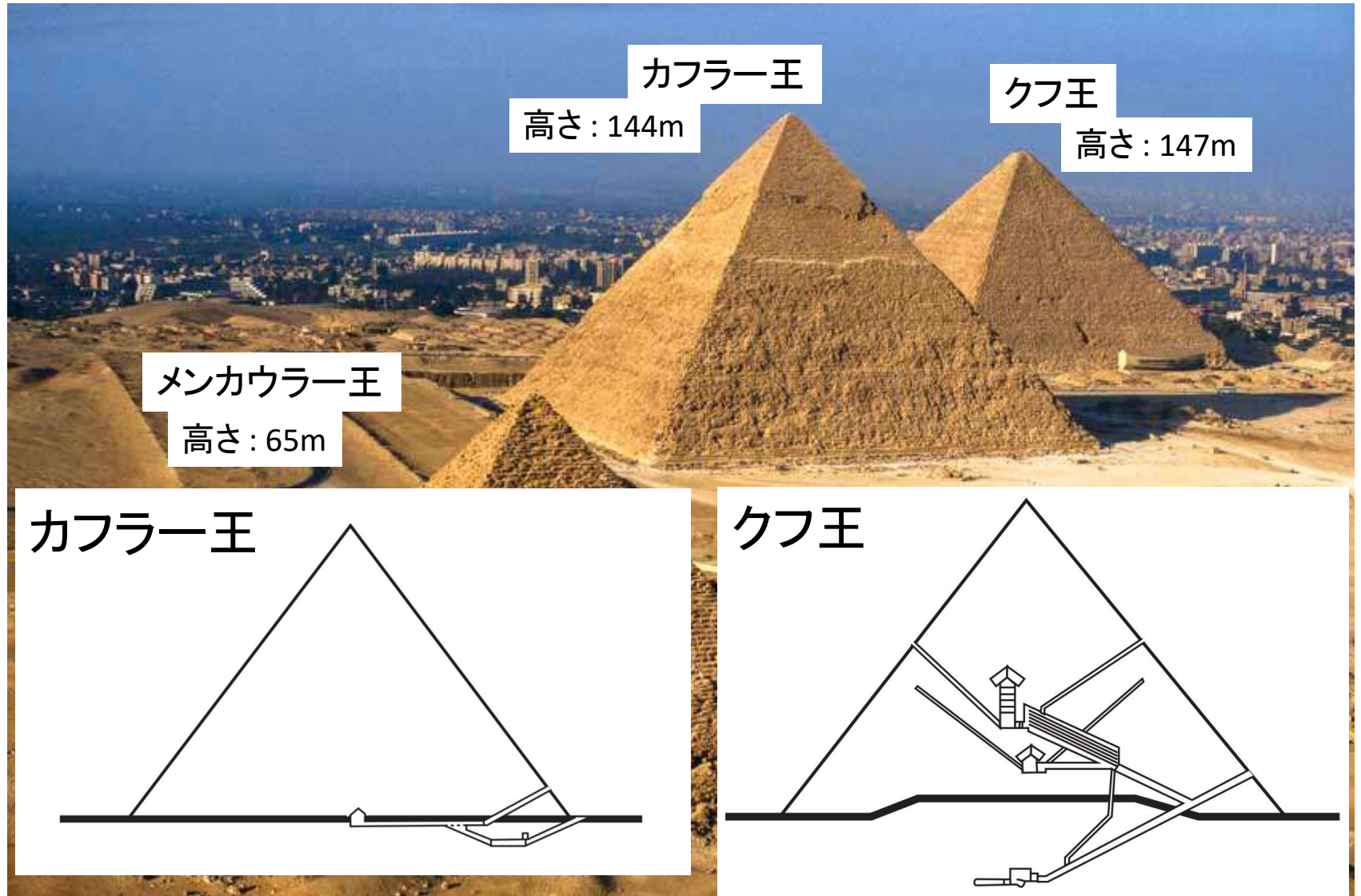
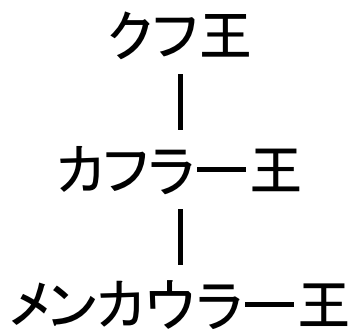
家系図

クフ王
|
カフラー王
|
メンカウラー王



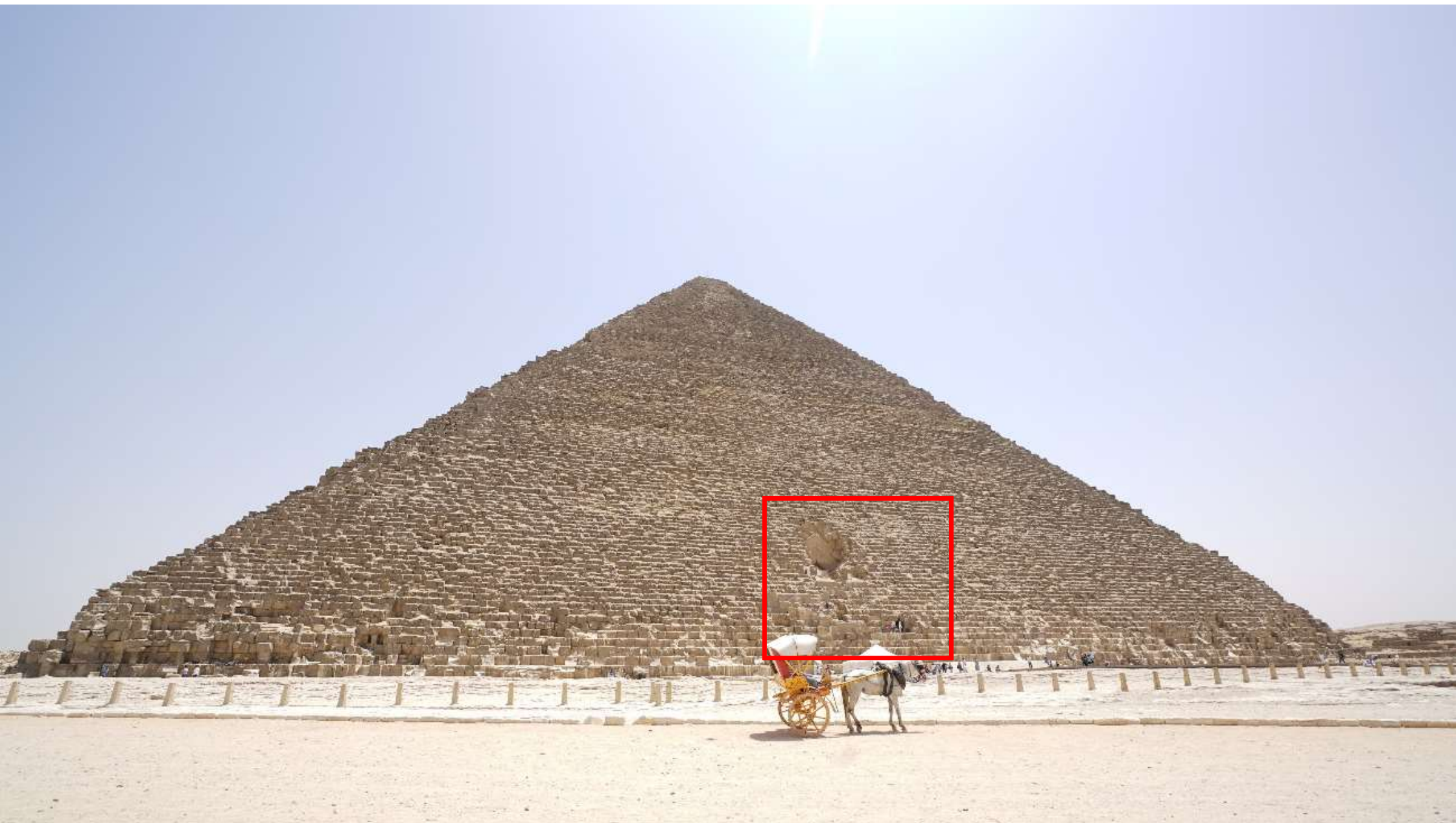
ギザの3大ピラミッド

家系図

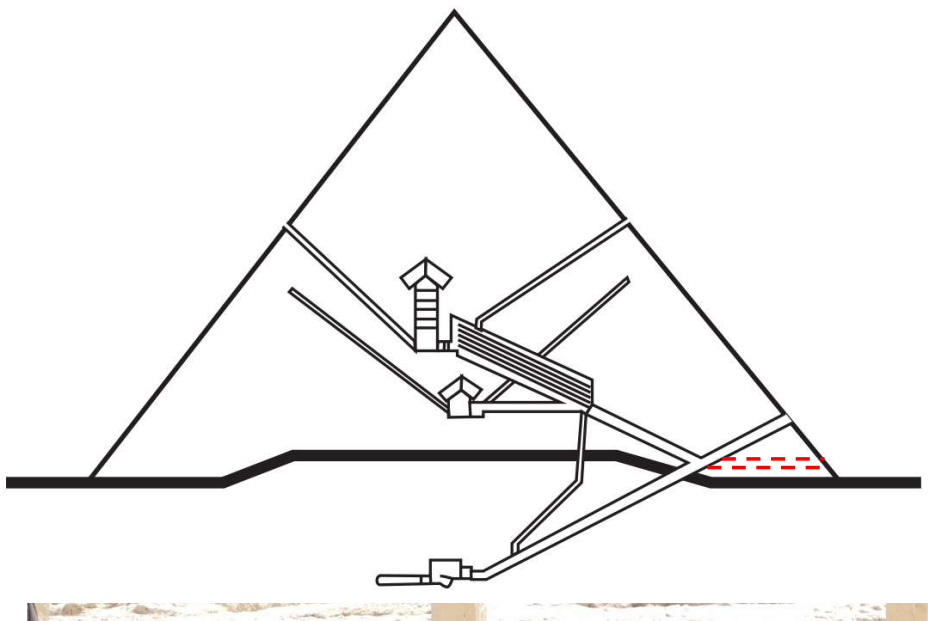
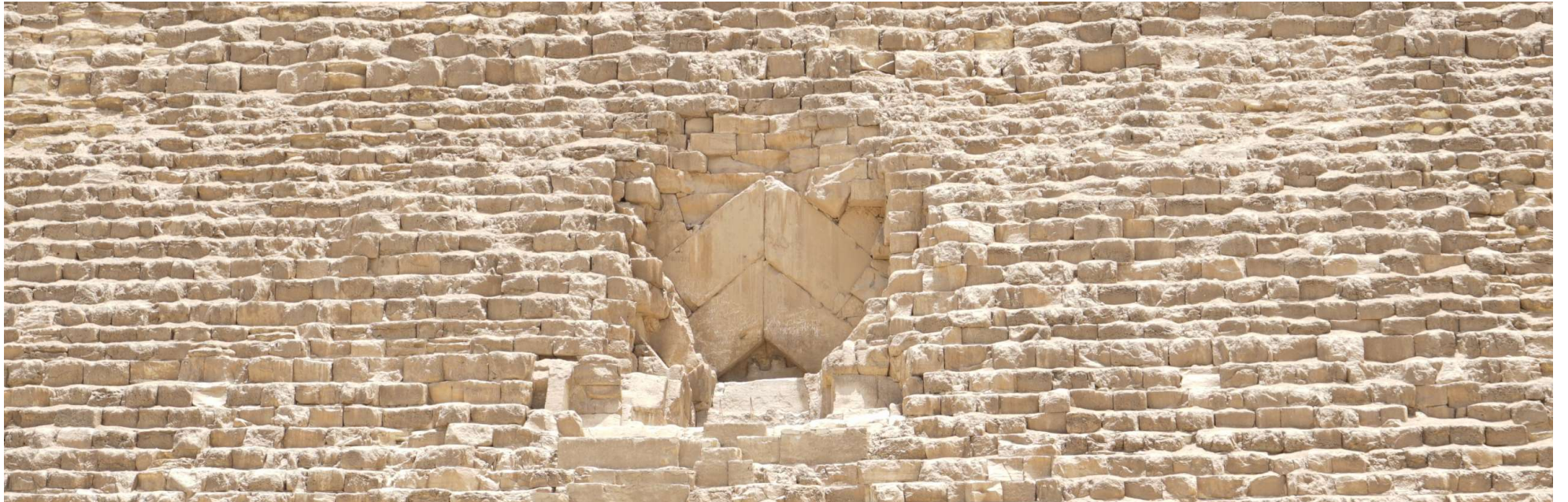


ピラミッドの内部構造を非破壊で探る



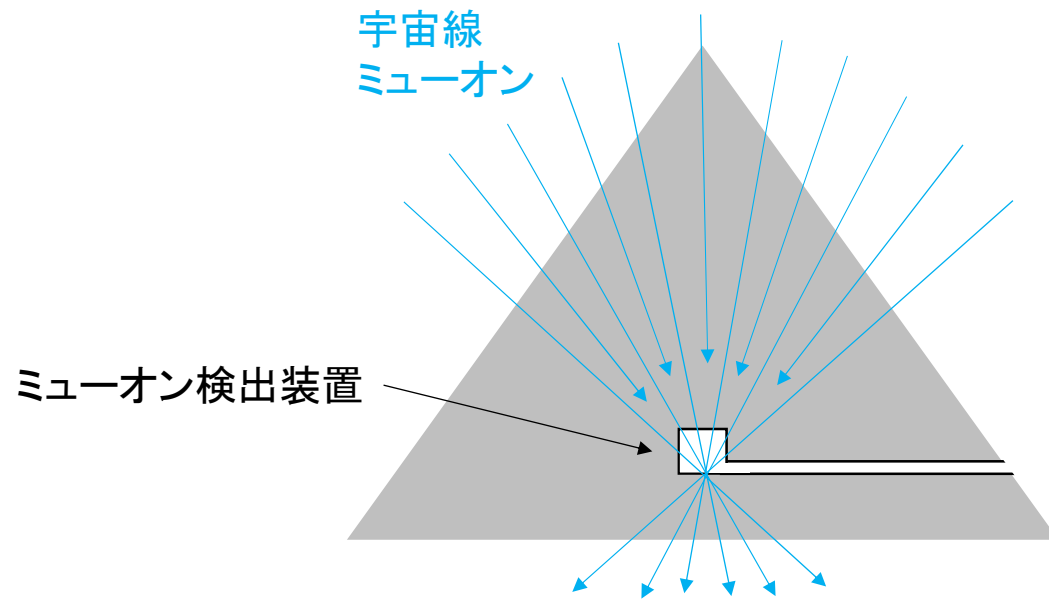




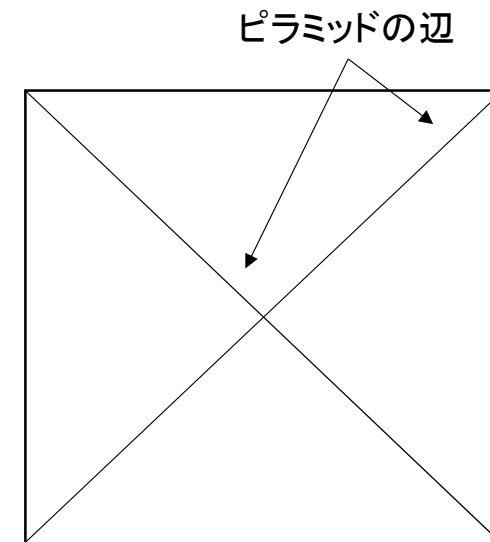


ピラミッドのレントゲン撮影

横から見た図

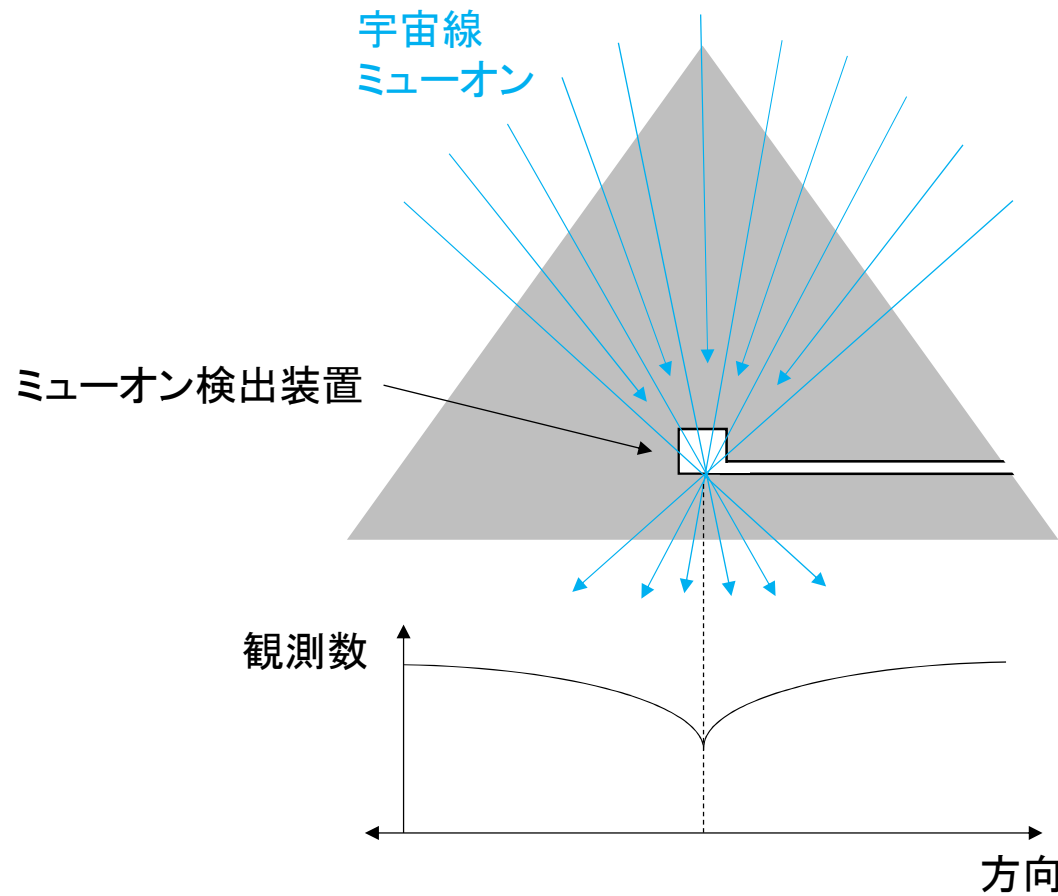


下から見上げた方向

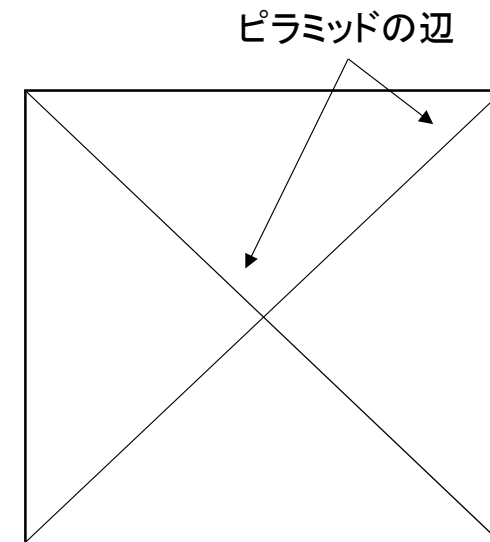


ピラミッドのレントゲン撮影

横から見た図

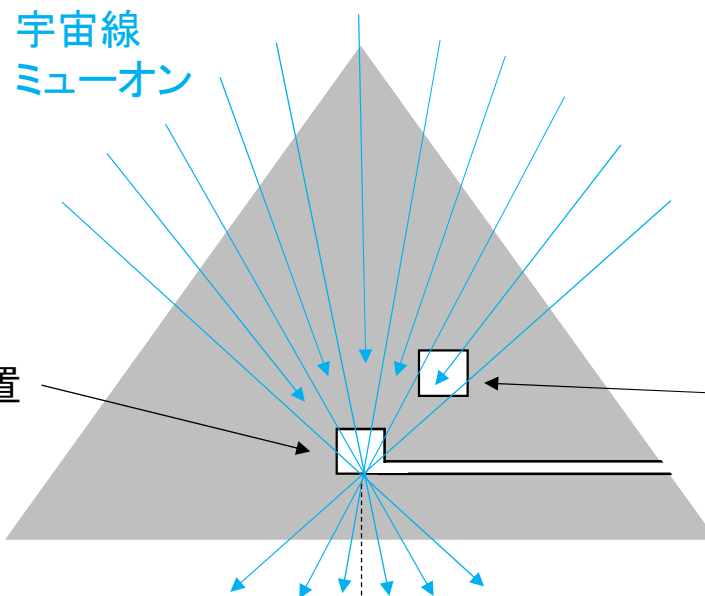


下から見上げた方向

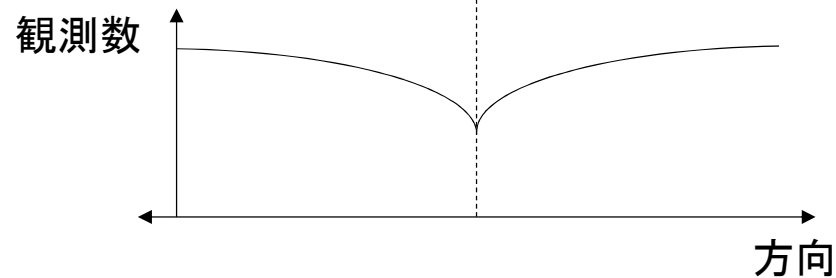
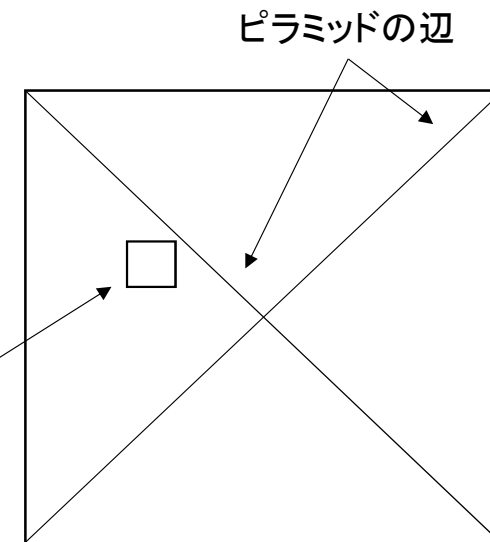


ピラミッドのレントゲン撮影

横から見た図



下から見上げた方向

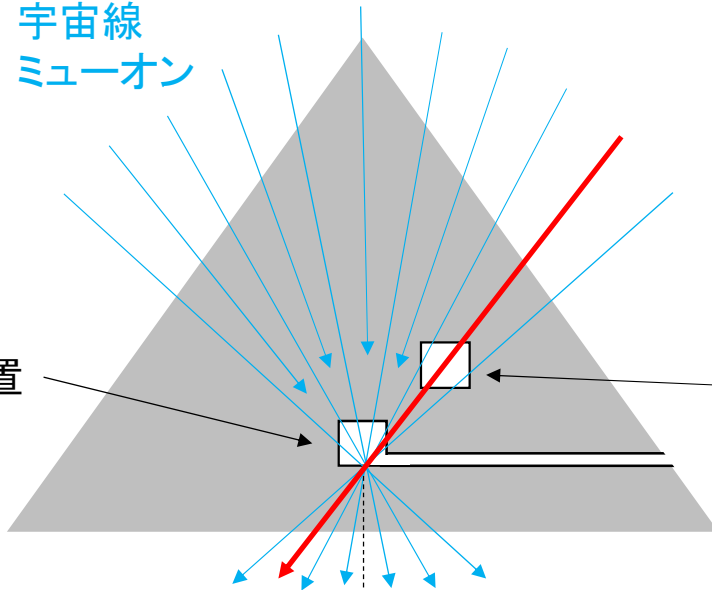


ピラミッドのレントゲン撮影

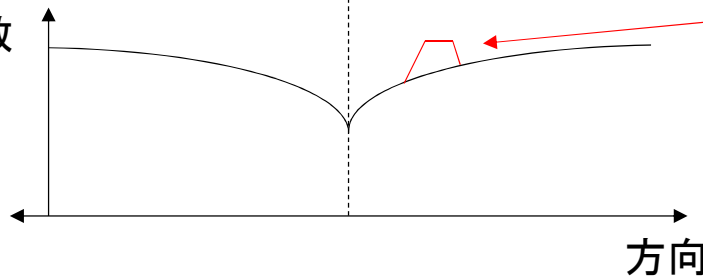
横から見た図

宇宙線
ミュオン

ミュオン検出装置

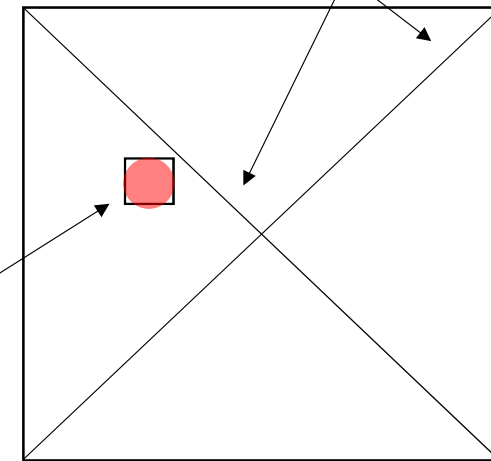


観測数



下から見上げた方向

ピラミッドの辺

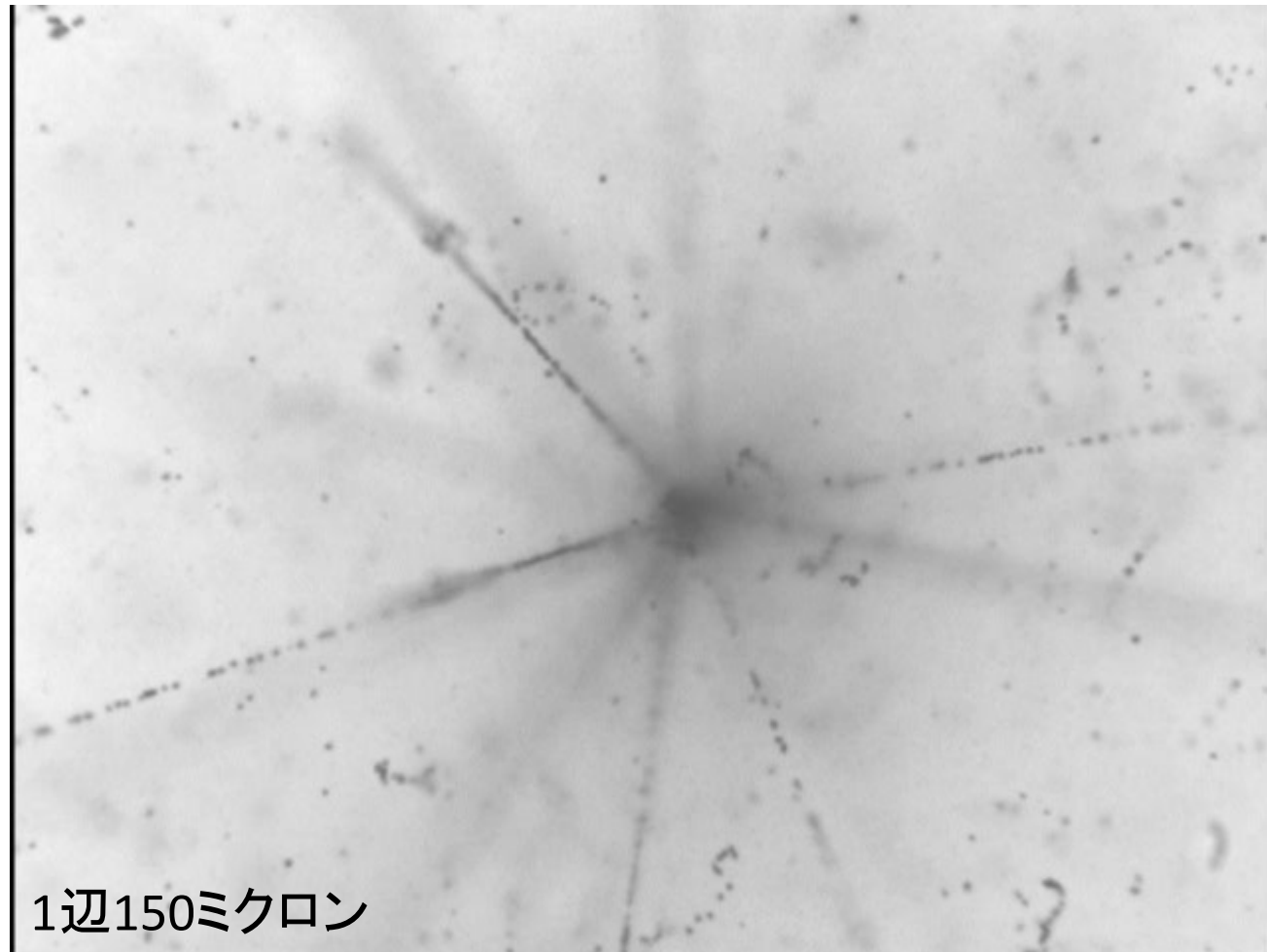
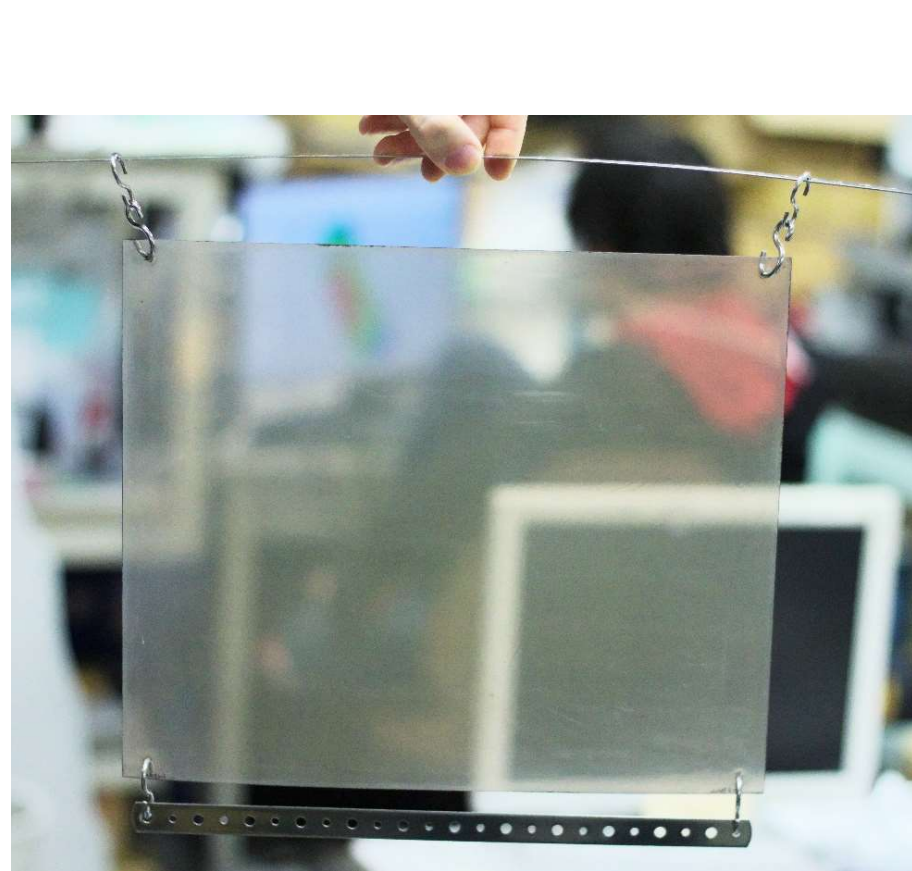


未知の
空間

未知の空間が存在すると
たくさんのミュオンがピラミッドを通り抜ける

ミュオンの到来方向を
3次元的に検出する装置が必要

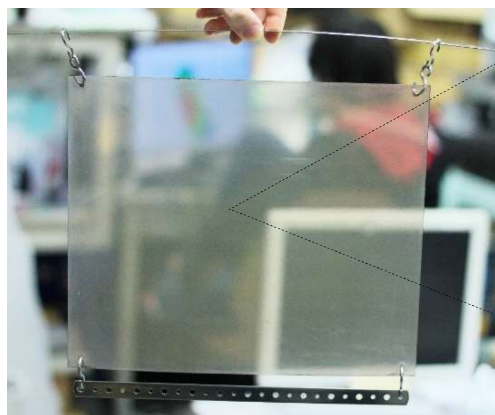
宇宙線を検出する写真フィルム 「原子核乾板」



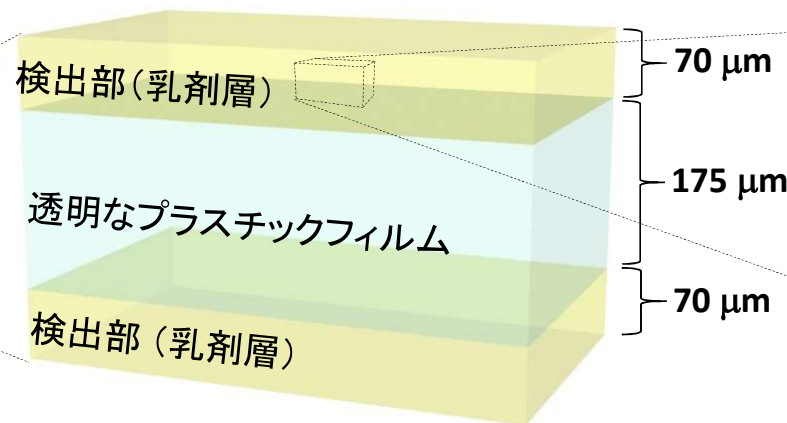
1辺150ミクロン

宇宙線を検出する写真フィルム 「原子核乾板」

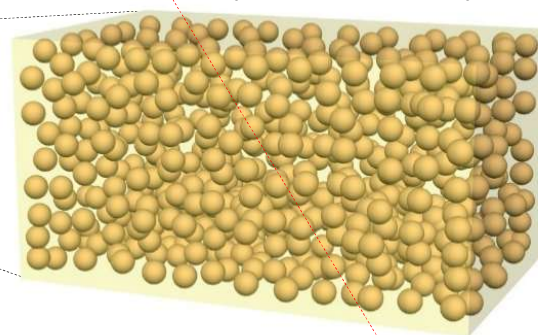
現像後の原子核乾板



断面図

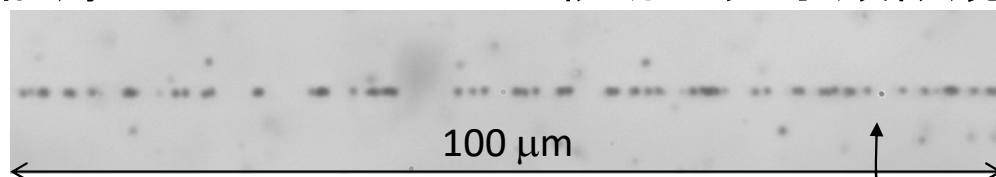


臭化銀結晶
(直径 200 nm)



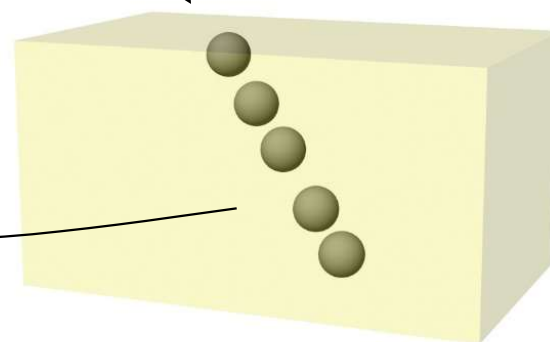
記録されたミュオンの軌跡の光学顕微鏡画像

ミュオン
→



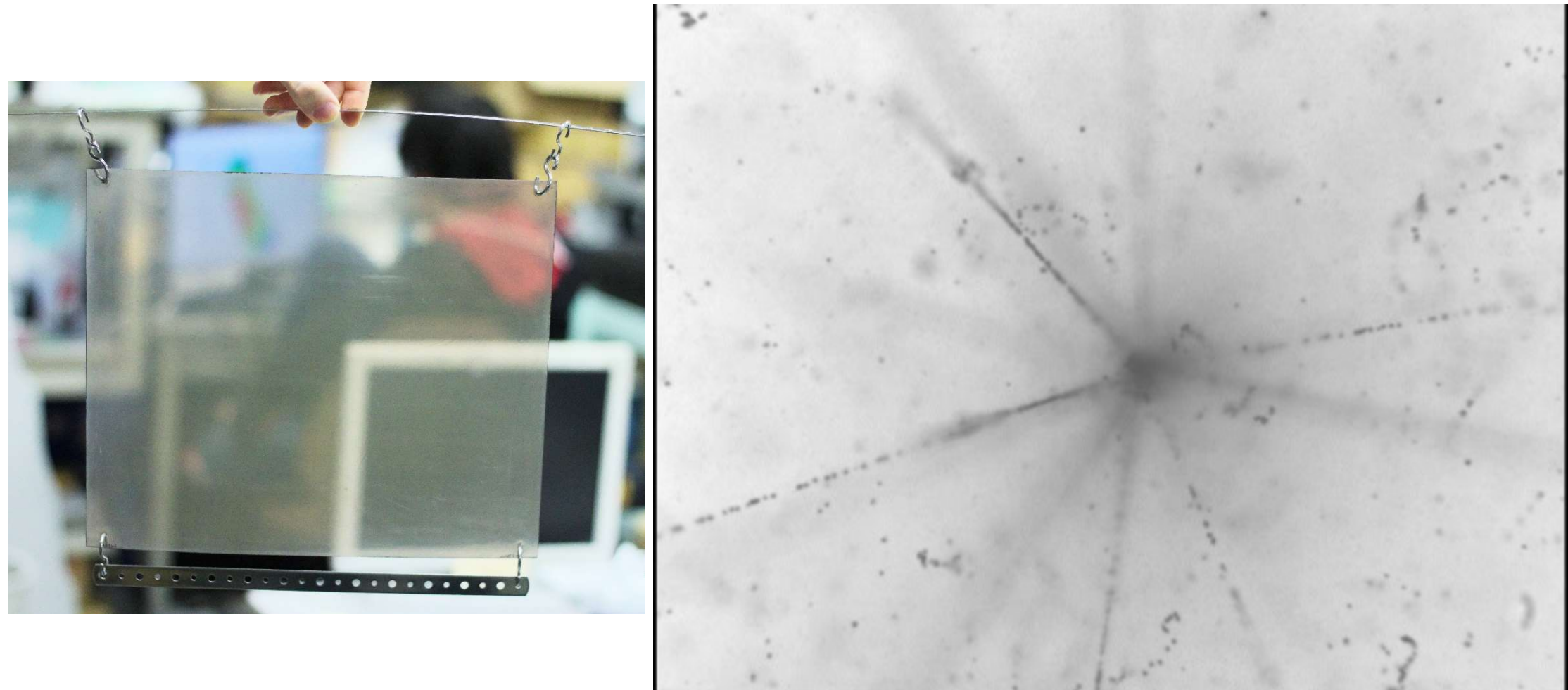
写真現像

ミュオン

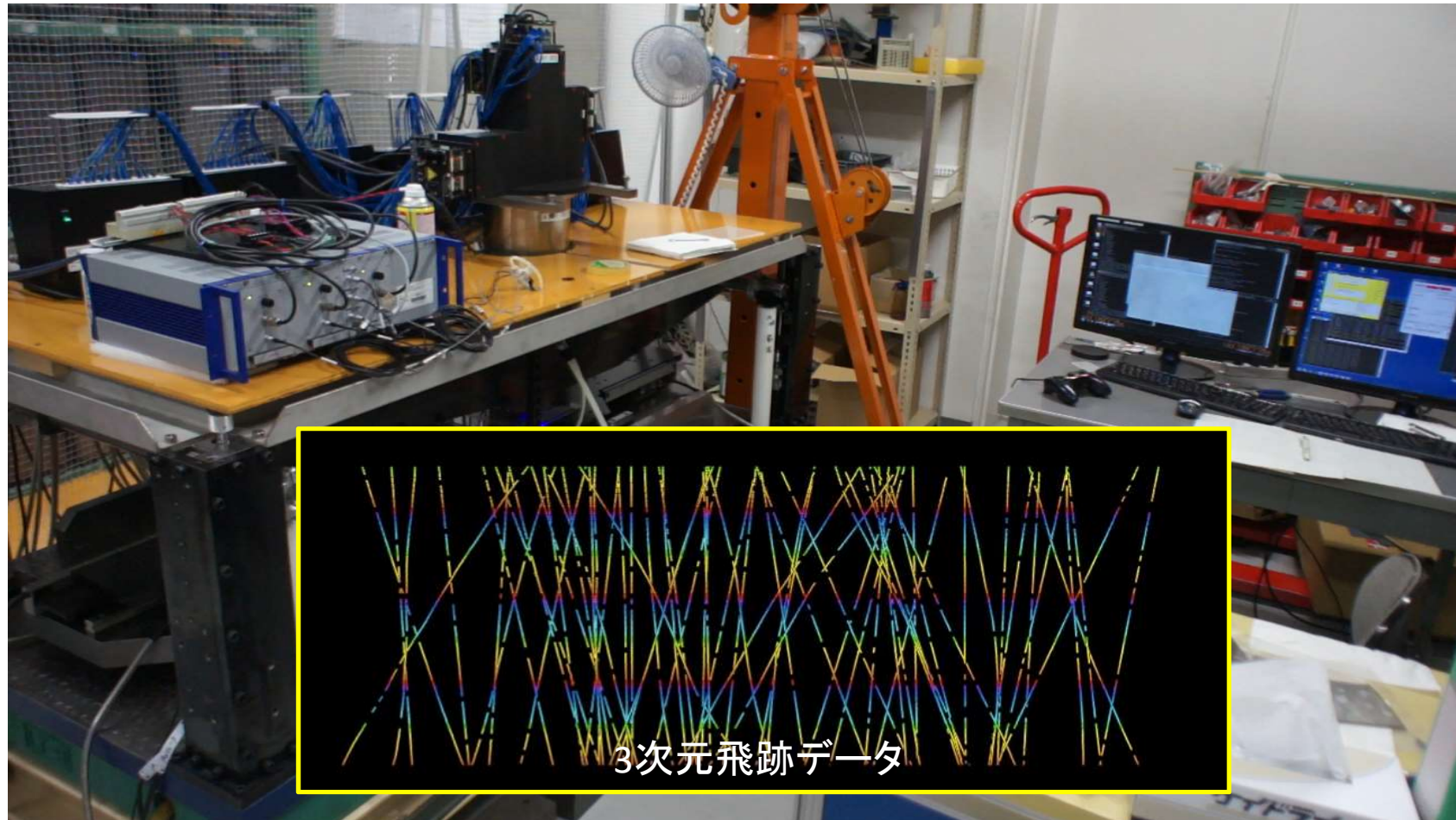


厚い感光層で放射線の軌跡を立体的に記録

宇宙線を検出する写真フィルム 「原子核乾板」



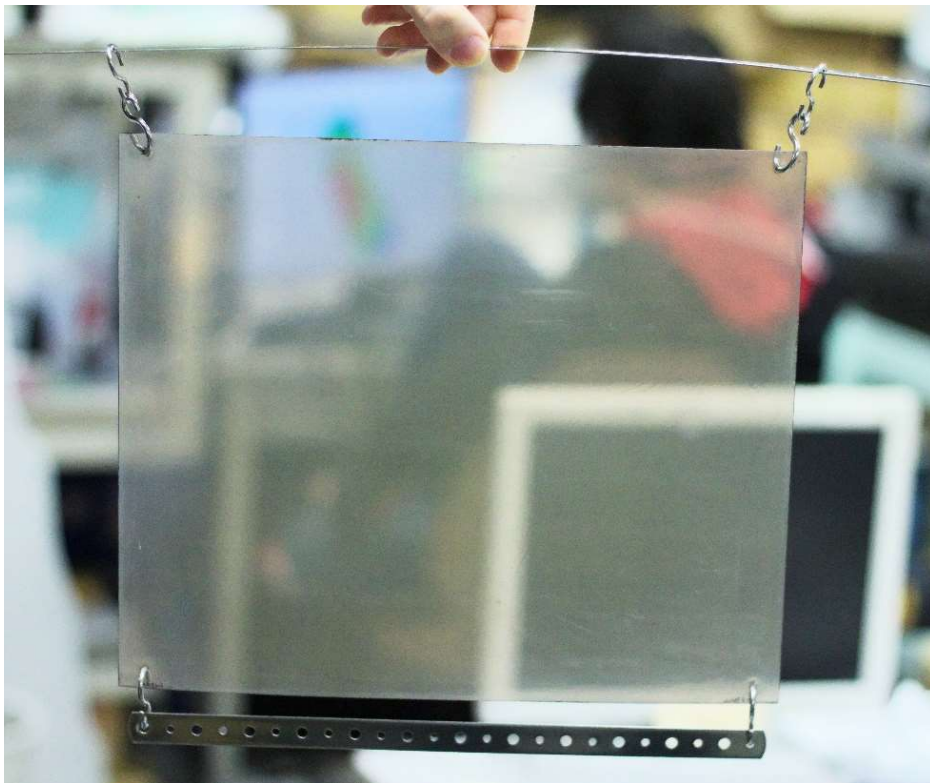
超高速“3次元”フィルムスキャナー:「自動飛跡読み取り装置」



世界最高速度の読み出し装置: $\sim 1\text{m}^2/\text{h}$

アナログ x デジタル

記録 読み出し



巨大な物体内部の可視化の方法

① 原理はレントゲン撮影



② 宇宙線



③ 特殊な写真フィルム



国際共同研究 ScanPyramids

2015年開始

・宇宙線イメージングの技術を基に立ち上げられたプロジェクト

エジプト考古省・カイロ大学が運営
参加国：日本、エジプト、フランス
参加研究機関：名古屋大学、KEK、CEA

©ScanPyramids

ScanPyramidsの調査対象

クフ王



カフラー王



屈折ピラミッド



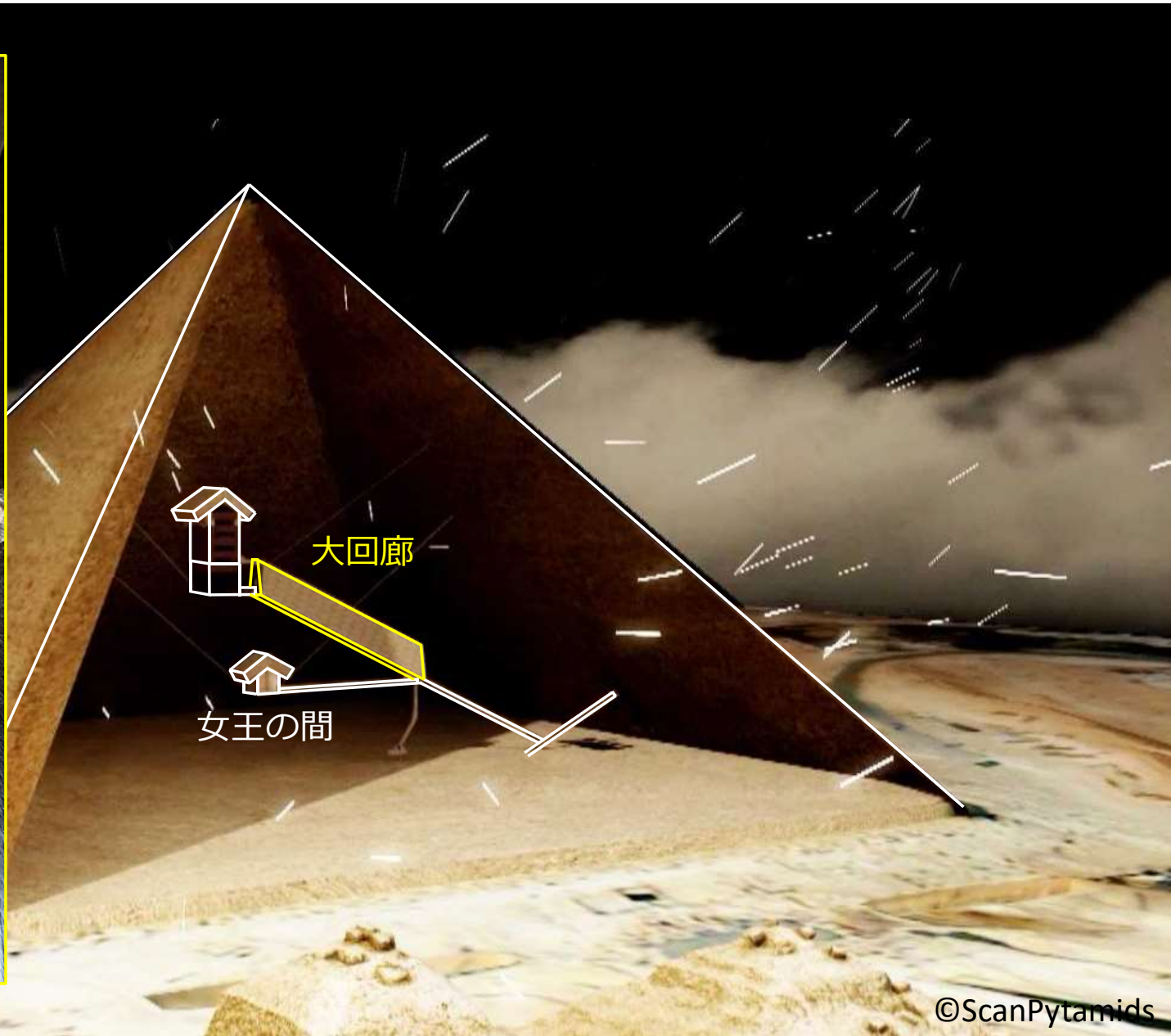
赤のピラミッド

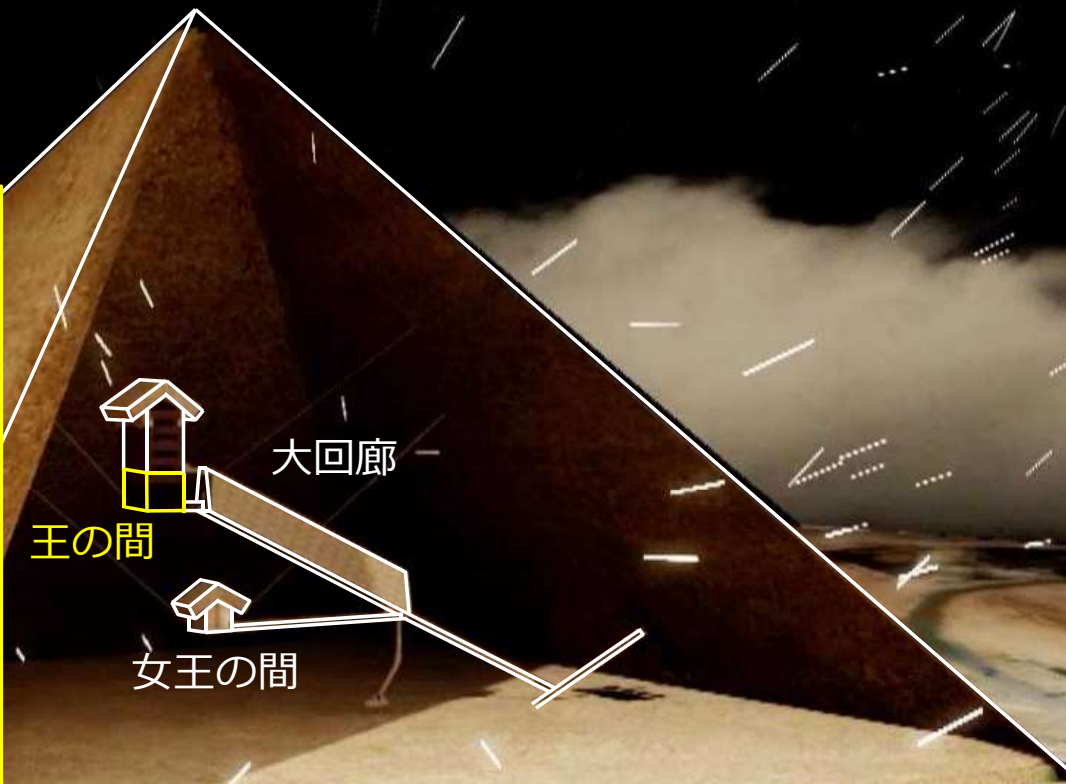




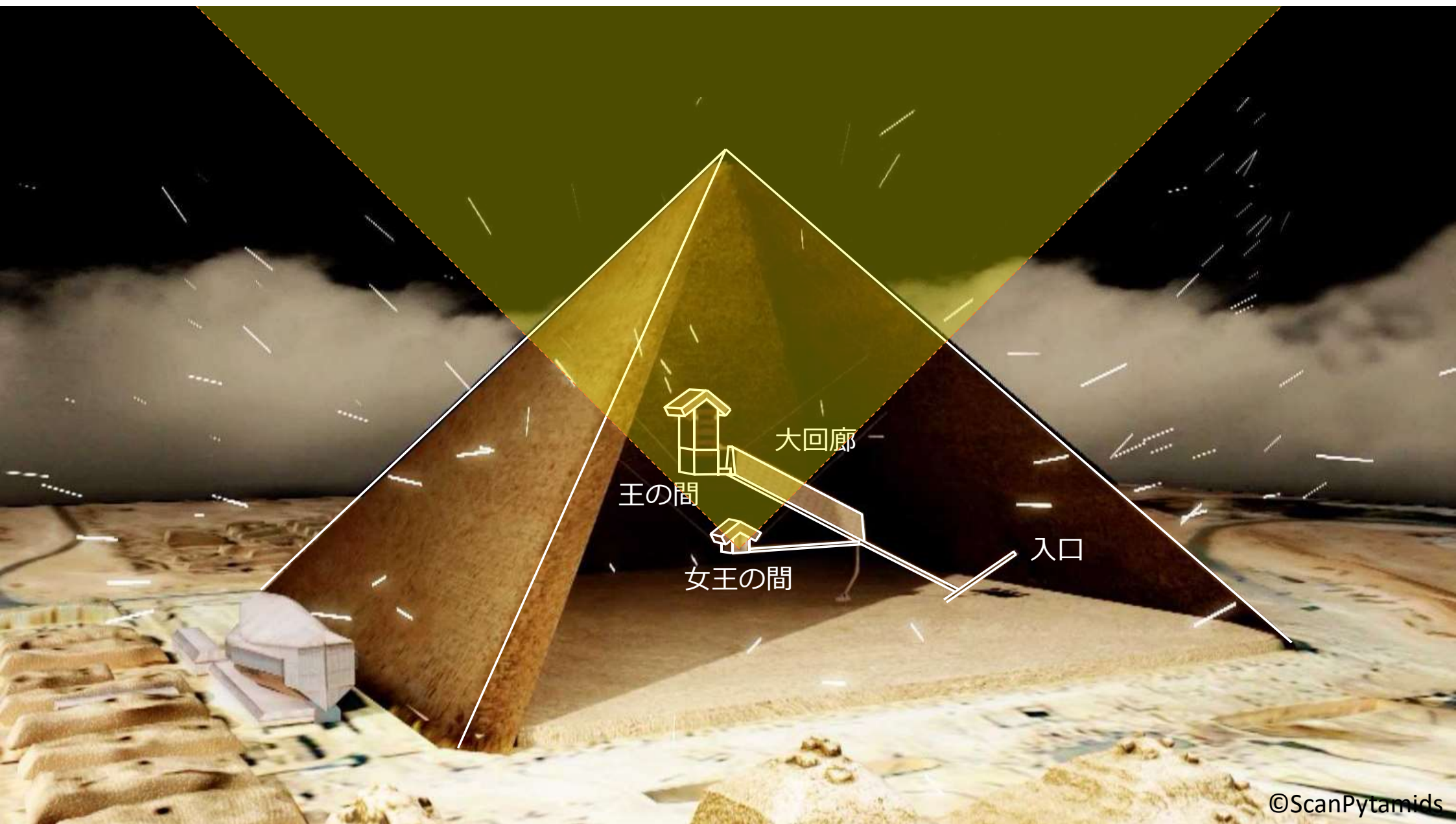


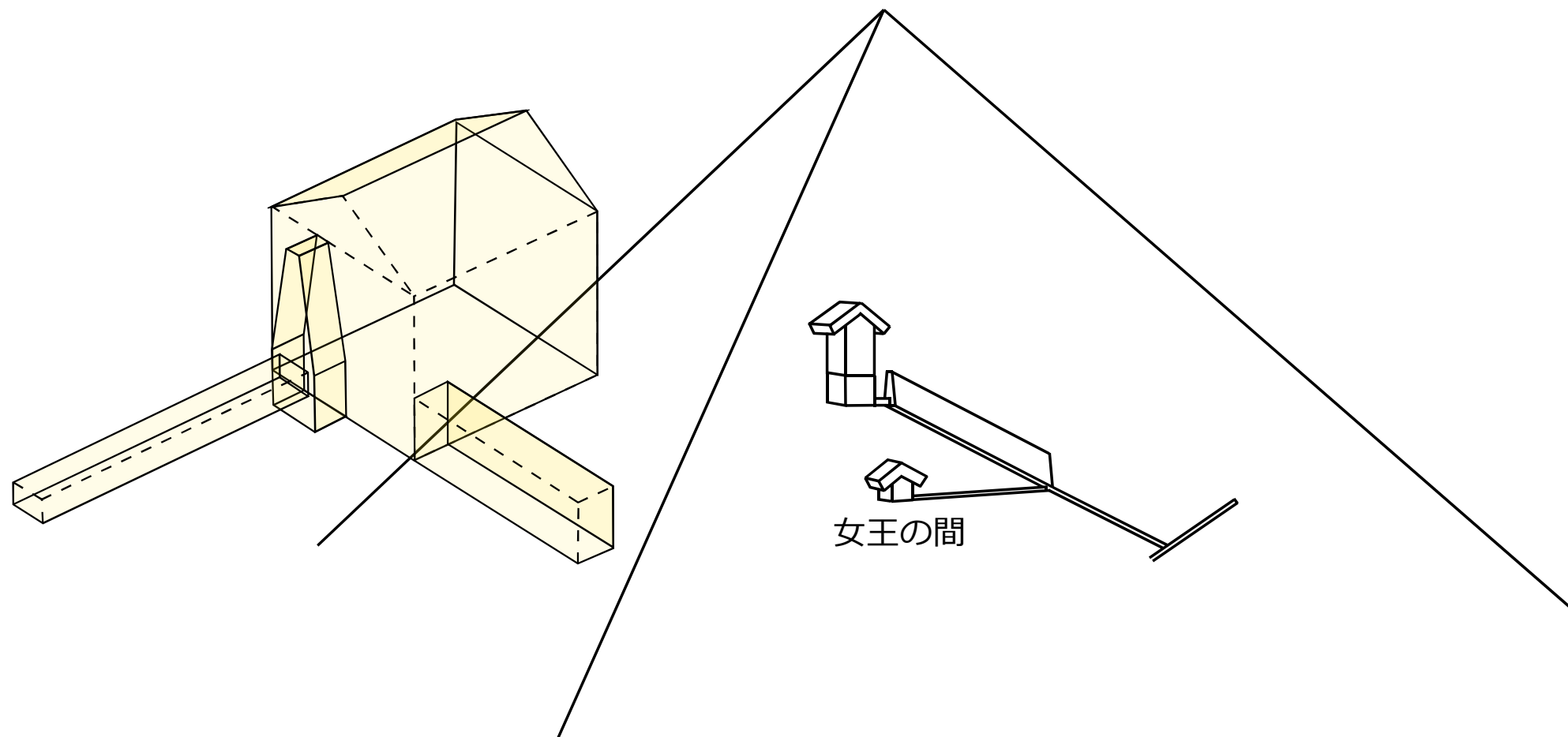
女王の間

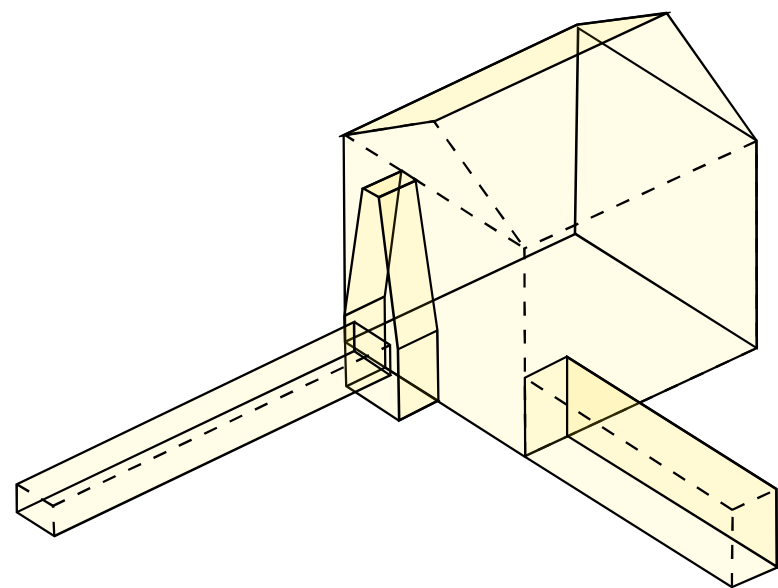


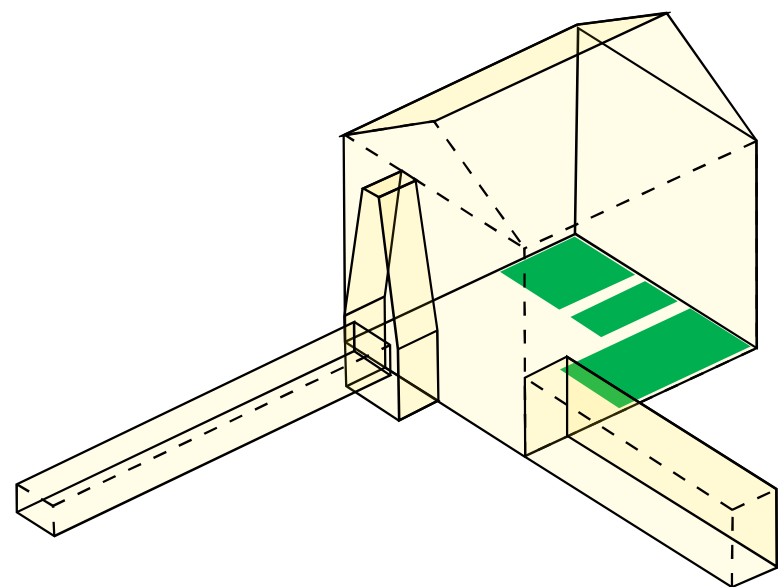


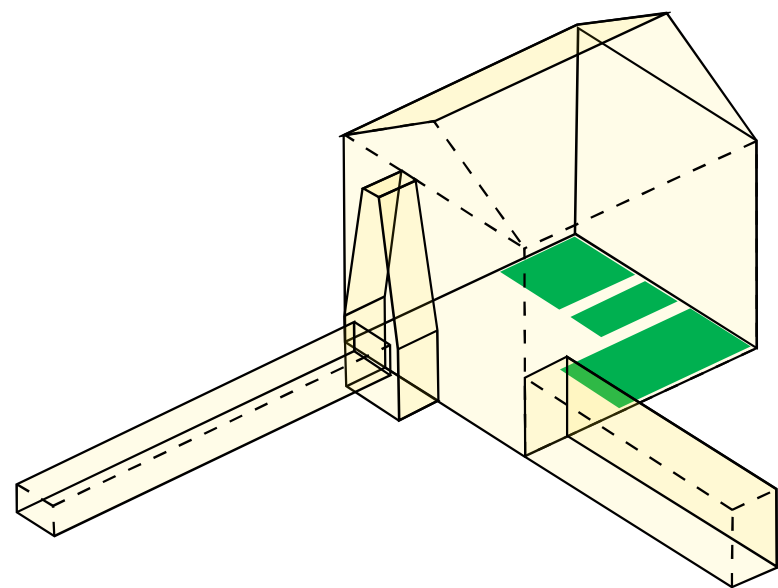


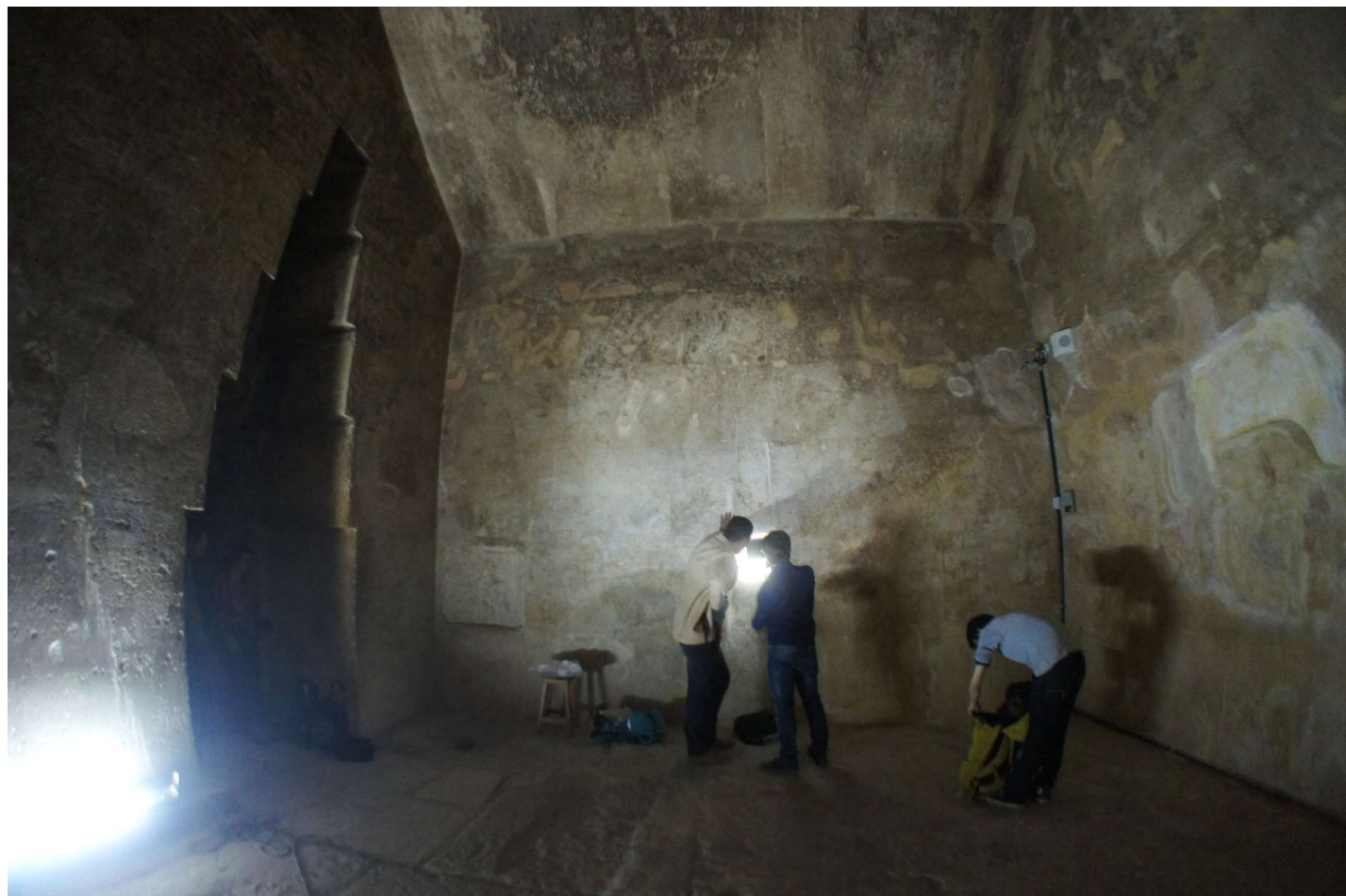
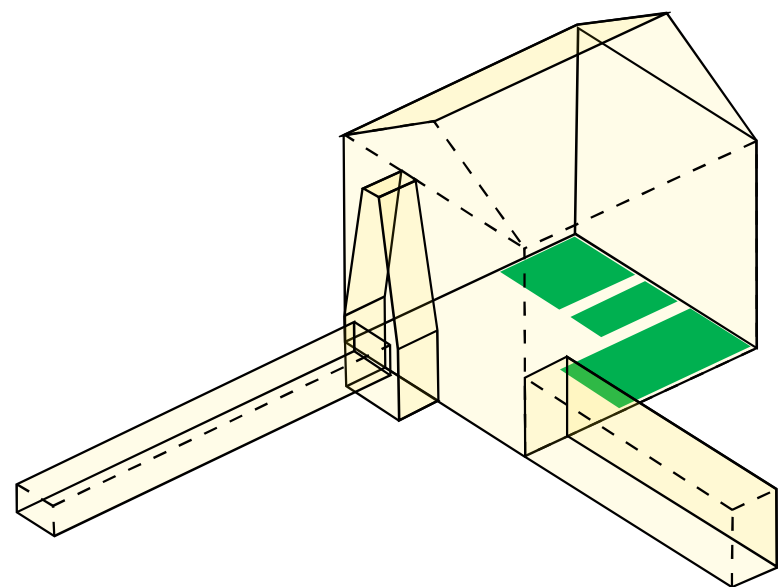


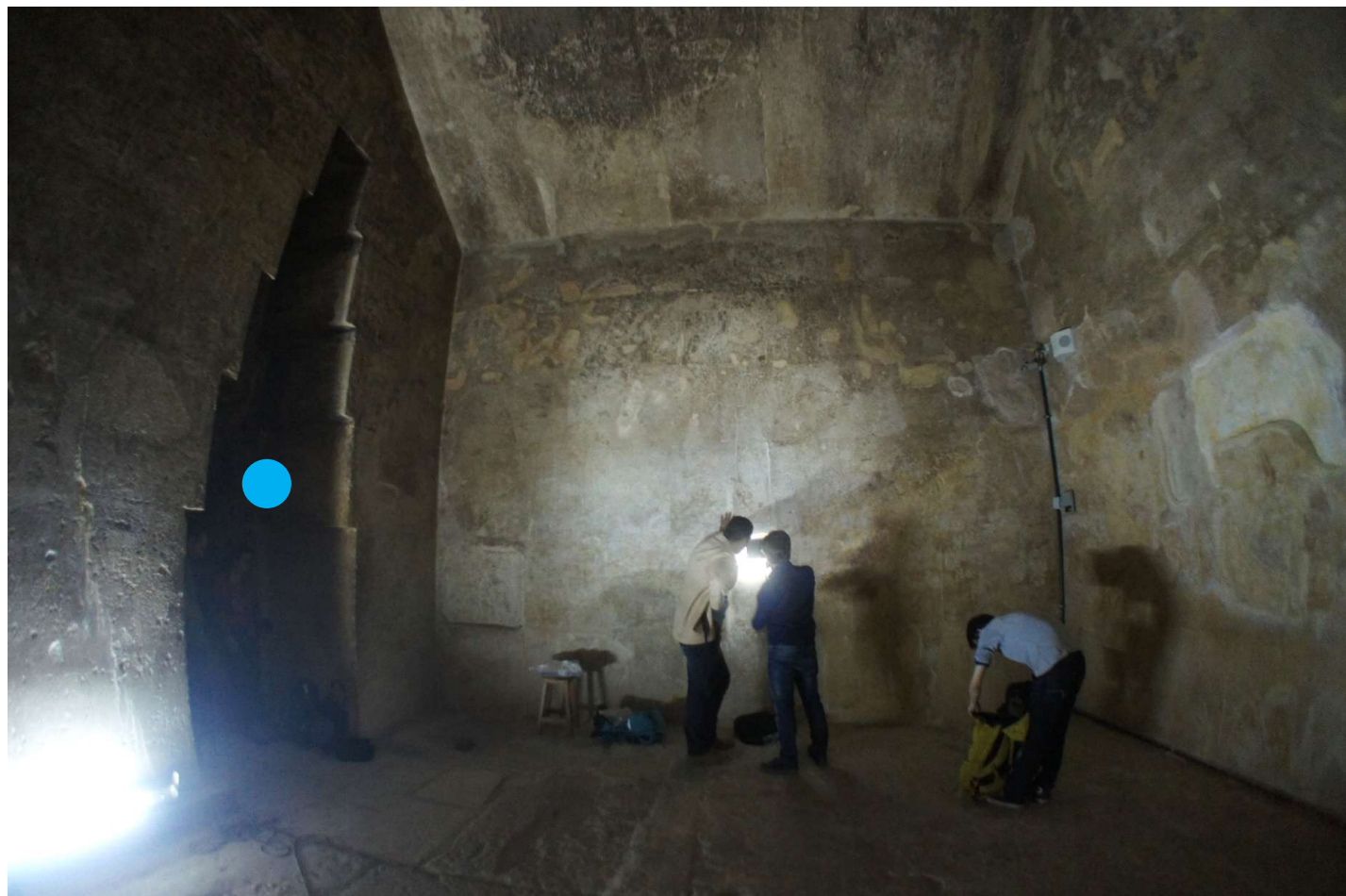
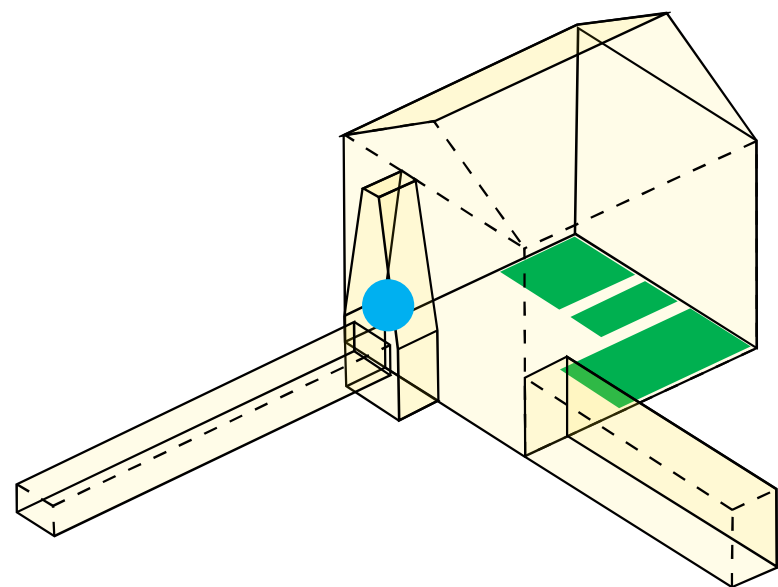


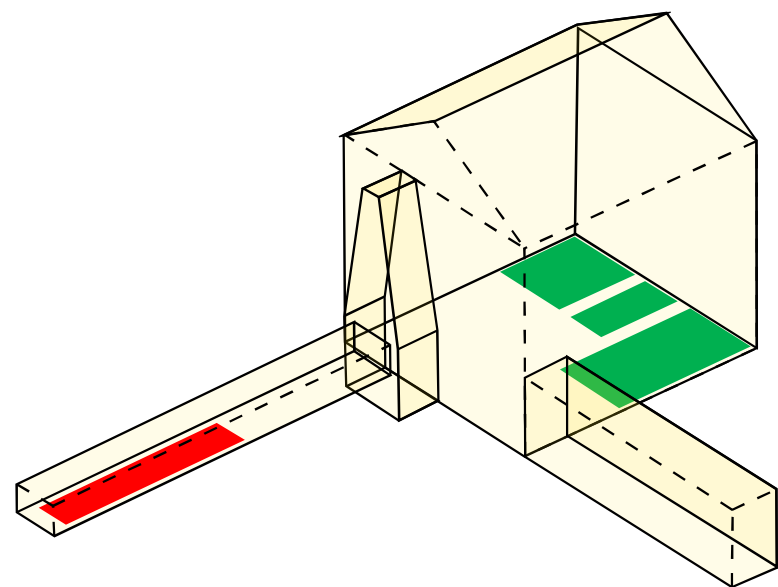


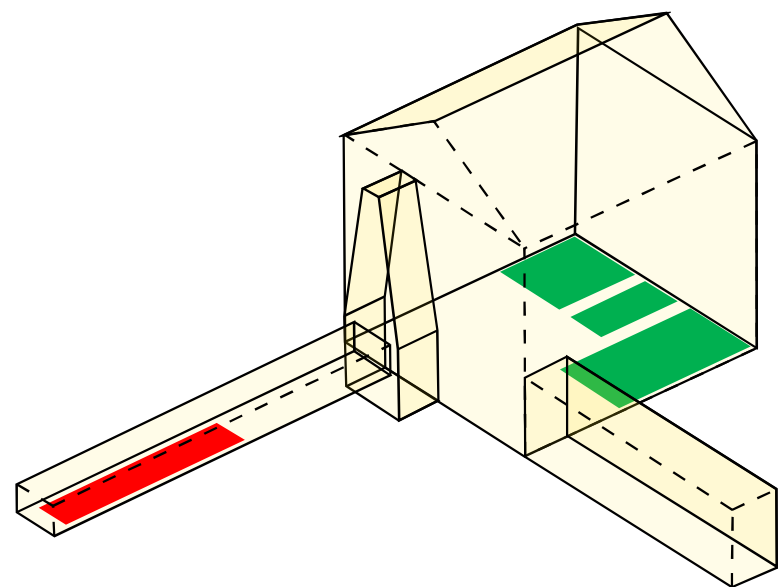












- ・2～3か月ごとにフィルム交換
- ・異なるフィルムのデータを積算して統計を上げる



エジプトに立ち上げた現像室で現像

JICAの支援により建設中の大エジプト博物館
Grand Egyptian Museum (GEM) の一室を借用



2019年開館予定 ???



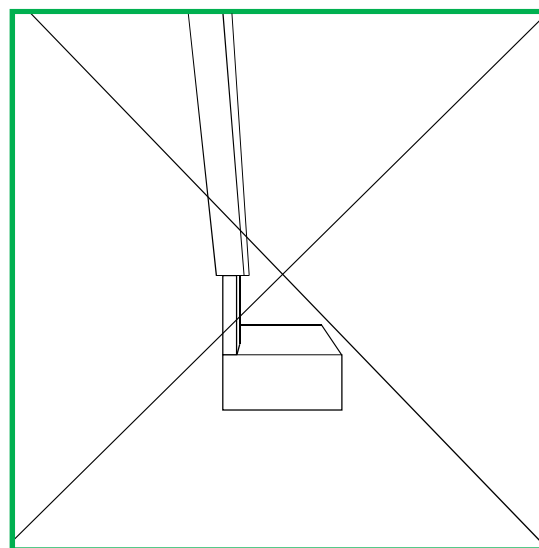
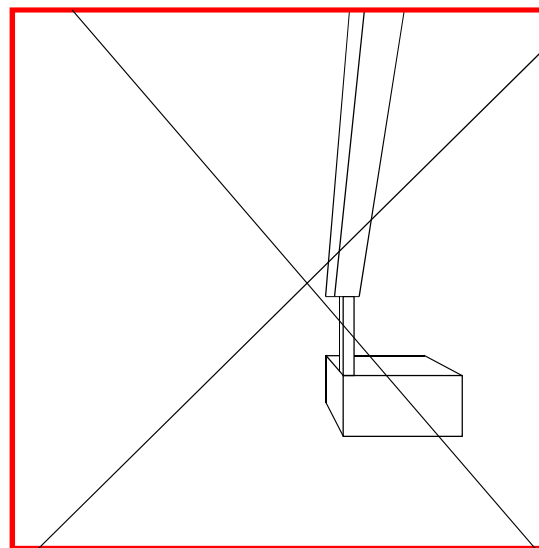
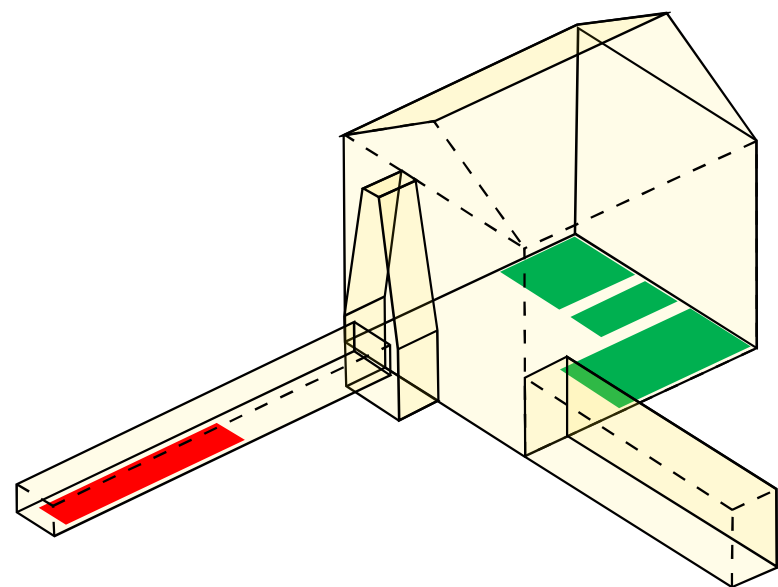
エジプトに立ち上げた現像室で現像

JICAにより建設中の大エジプト博物館
Grand Egyptian Museum の一室を借用

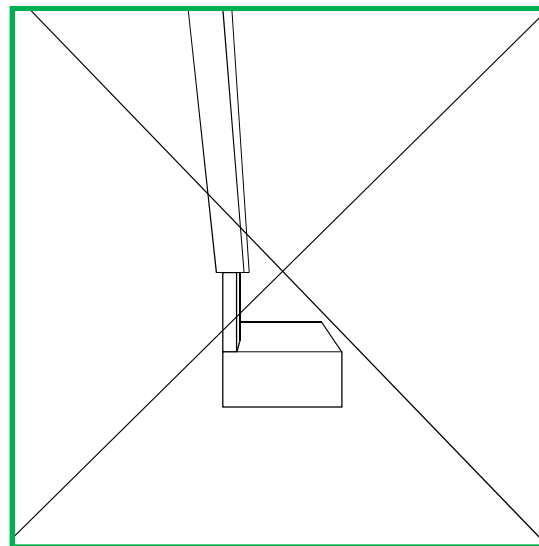
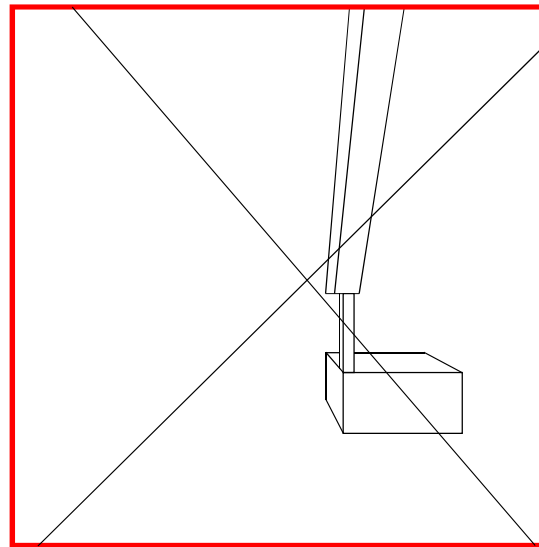
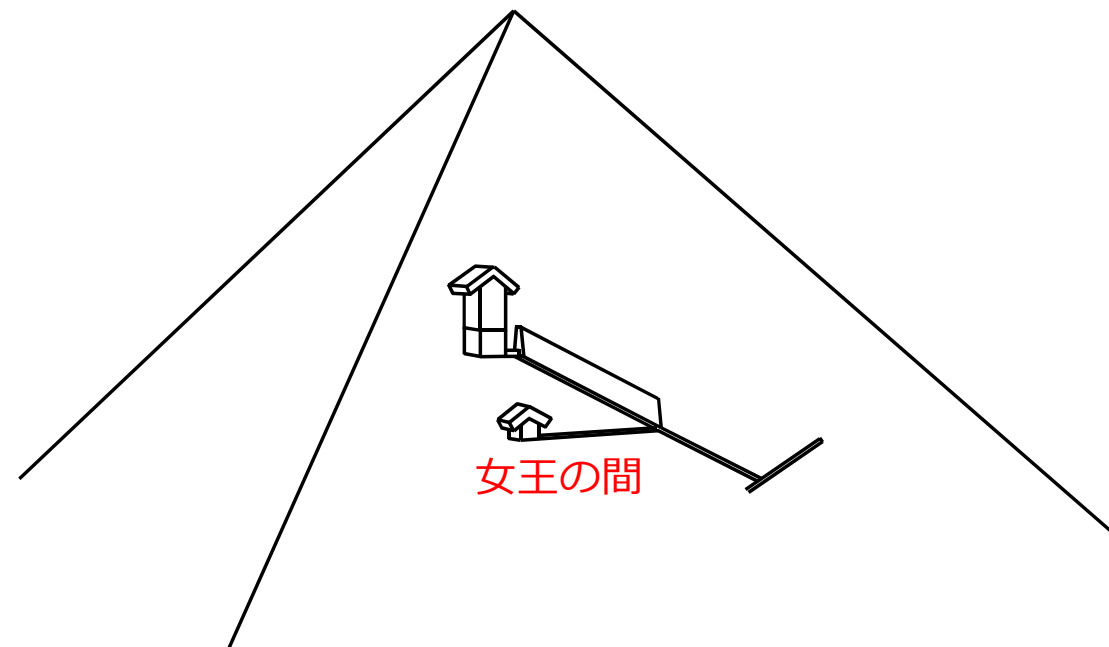


名古屋大学に持ち帰り宇宙線ミュオンの解析

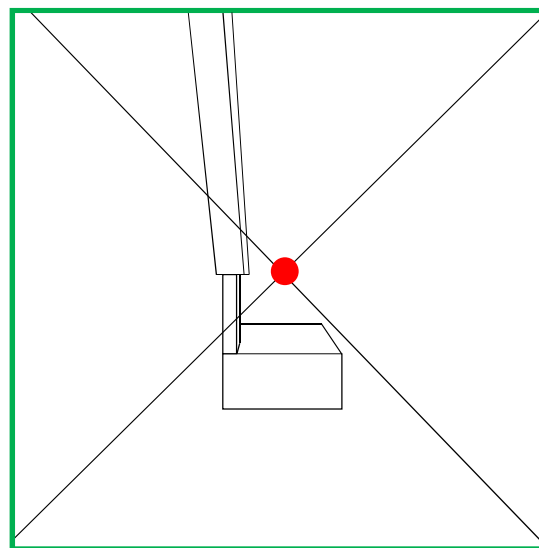
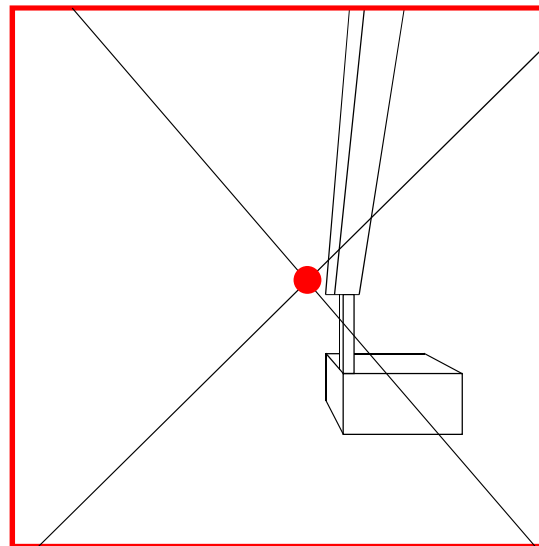
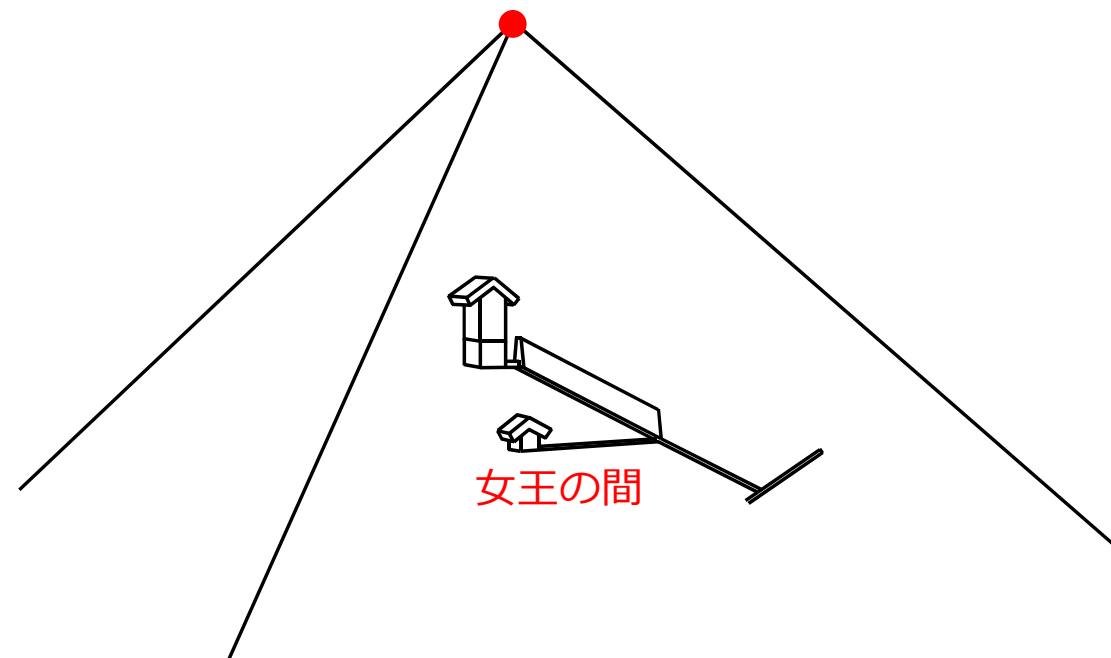
検出器から見上げた透視図



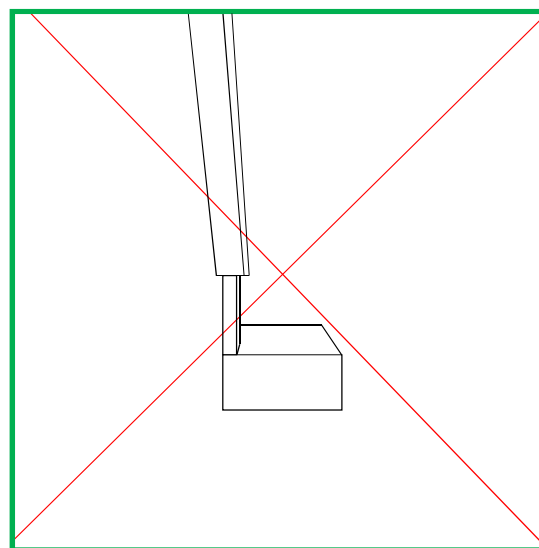
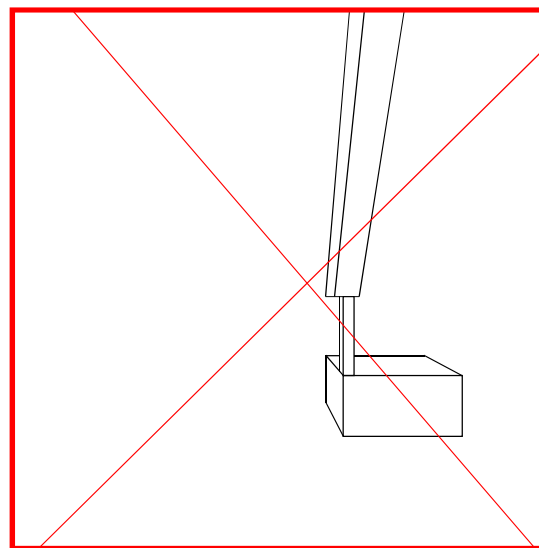
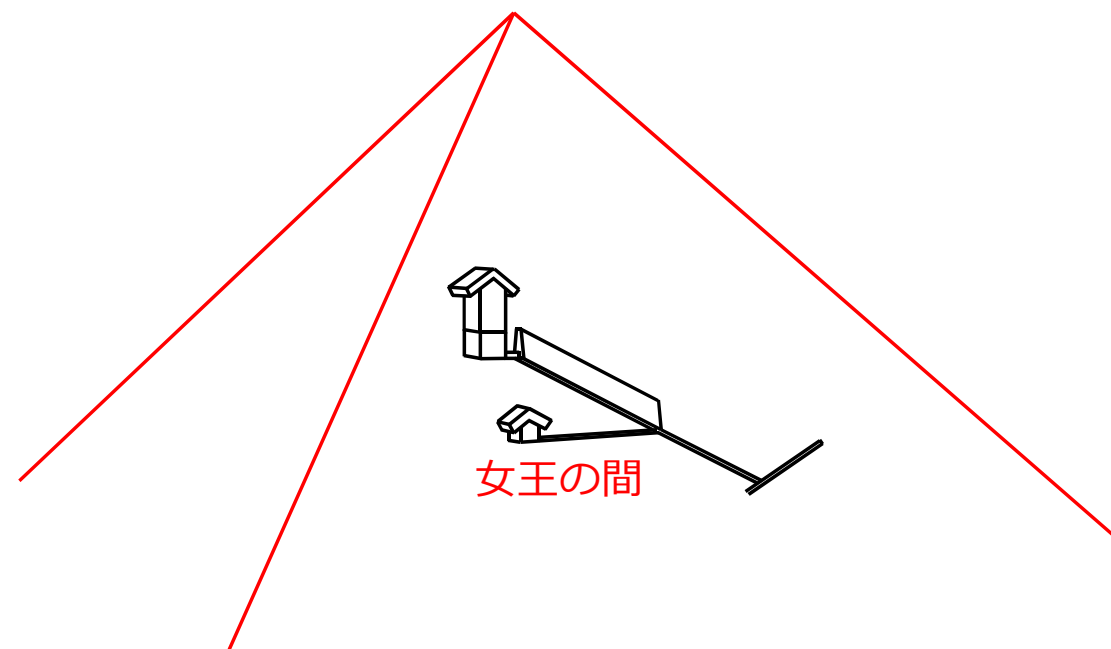
検出器から見上げた透視図



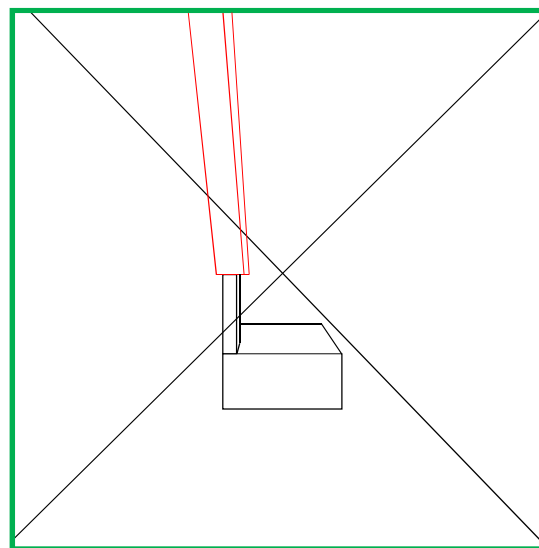
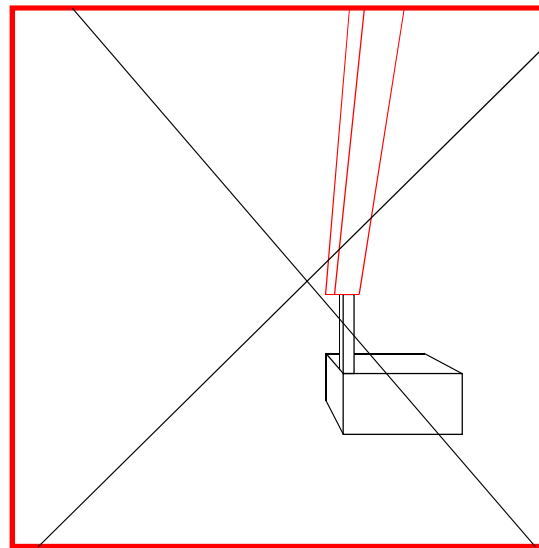
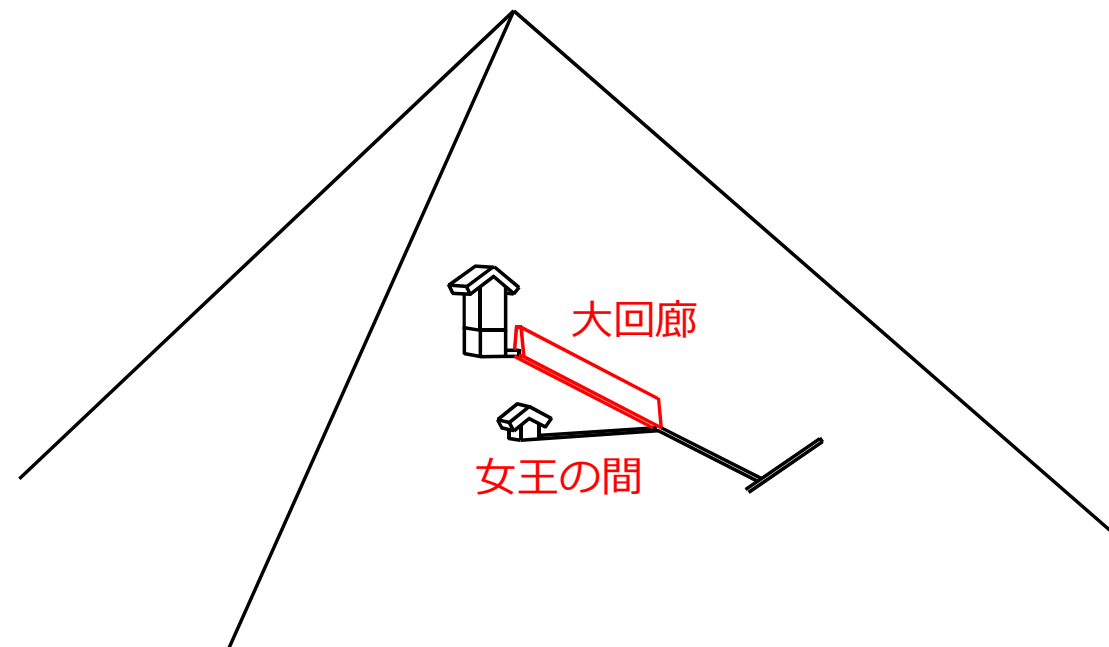
検出器から見上げた透視図



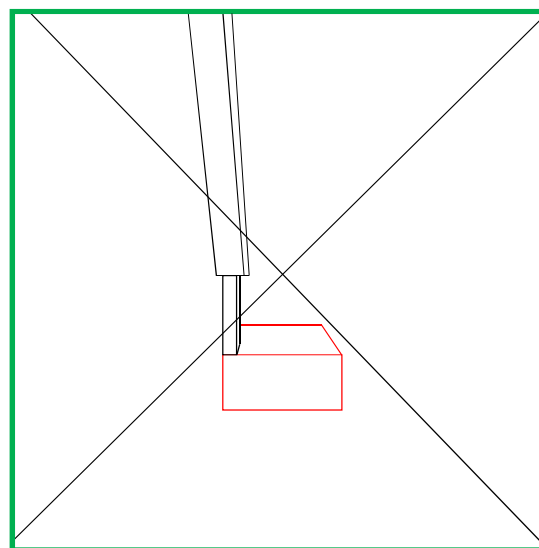
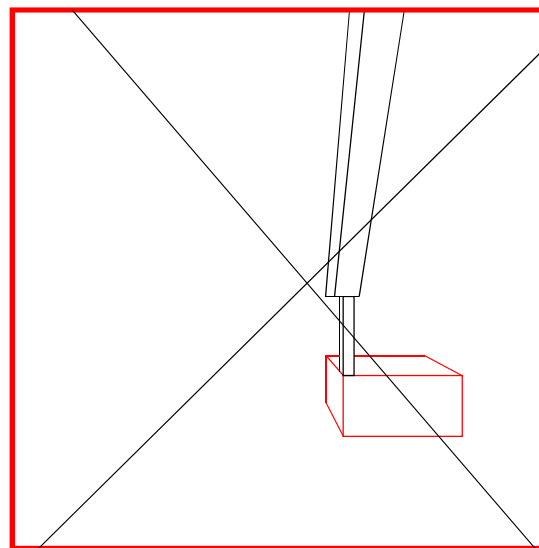
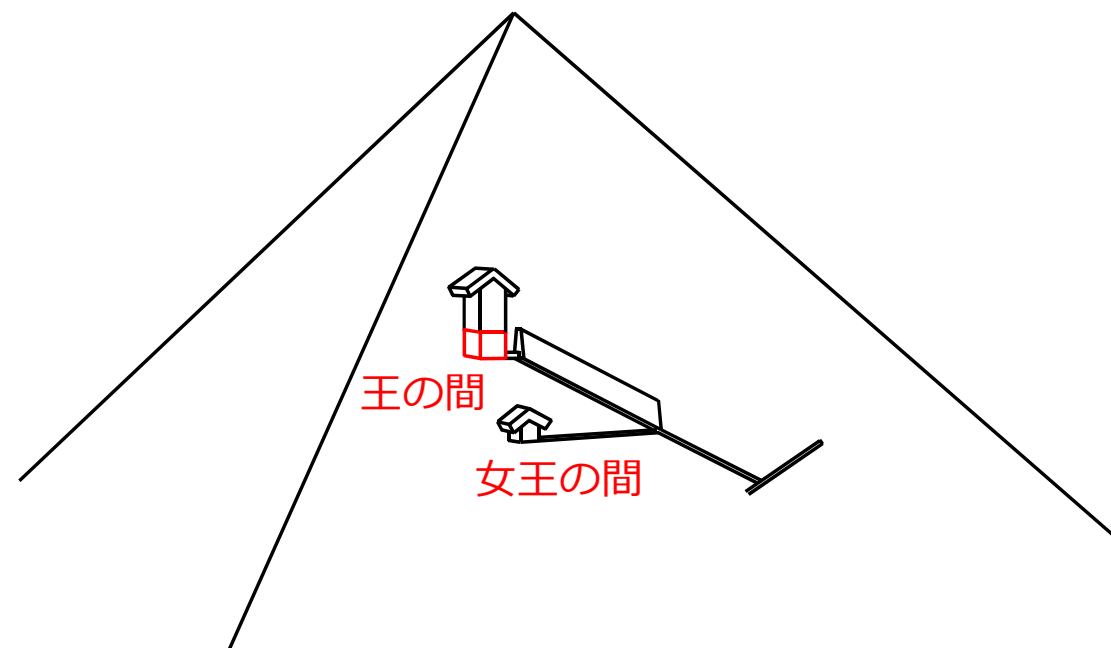
検出器から見上げた透視図



検出器から見上げた透視図

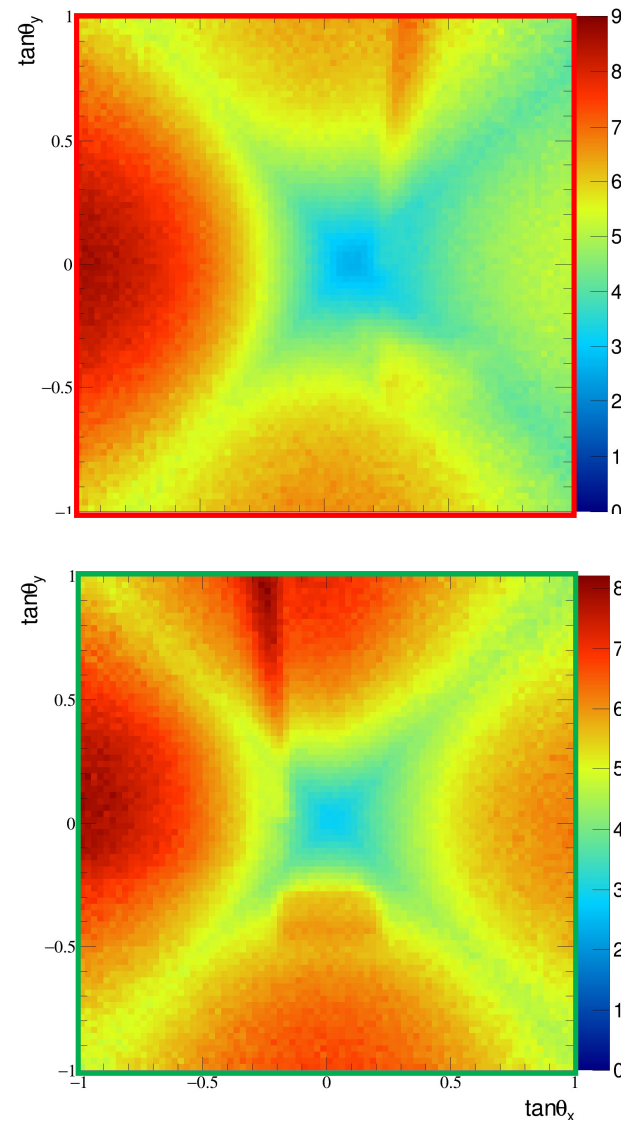


検出器から見上げた透視図

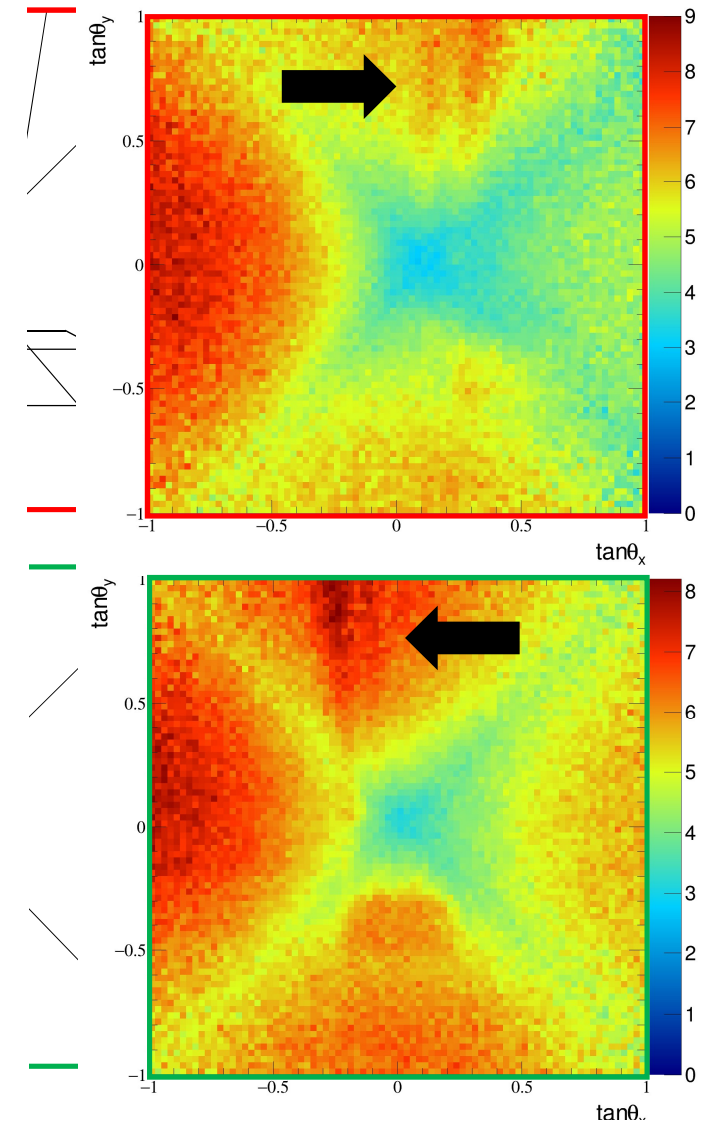


透視図

予想



結果

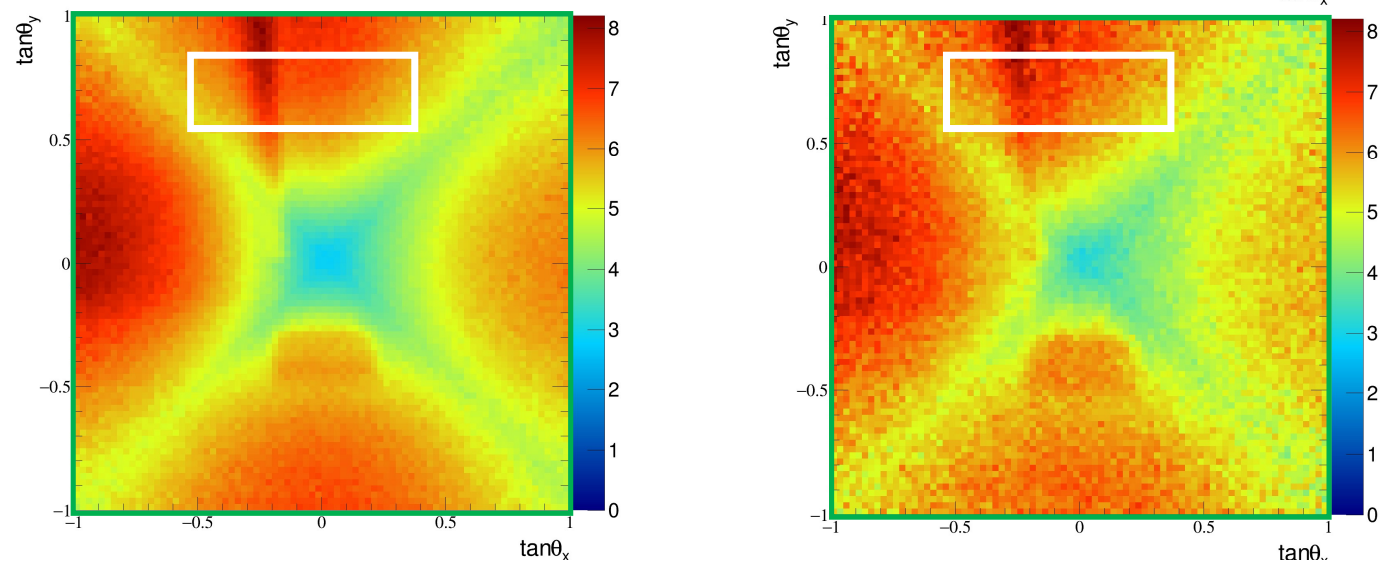
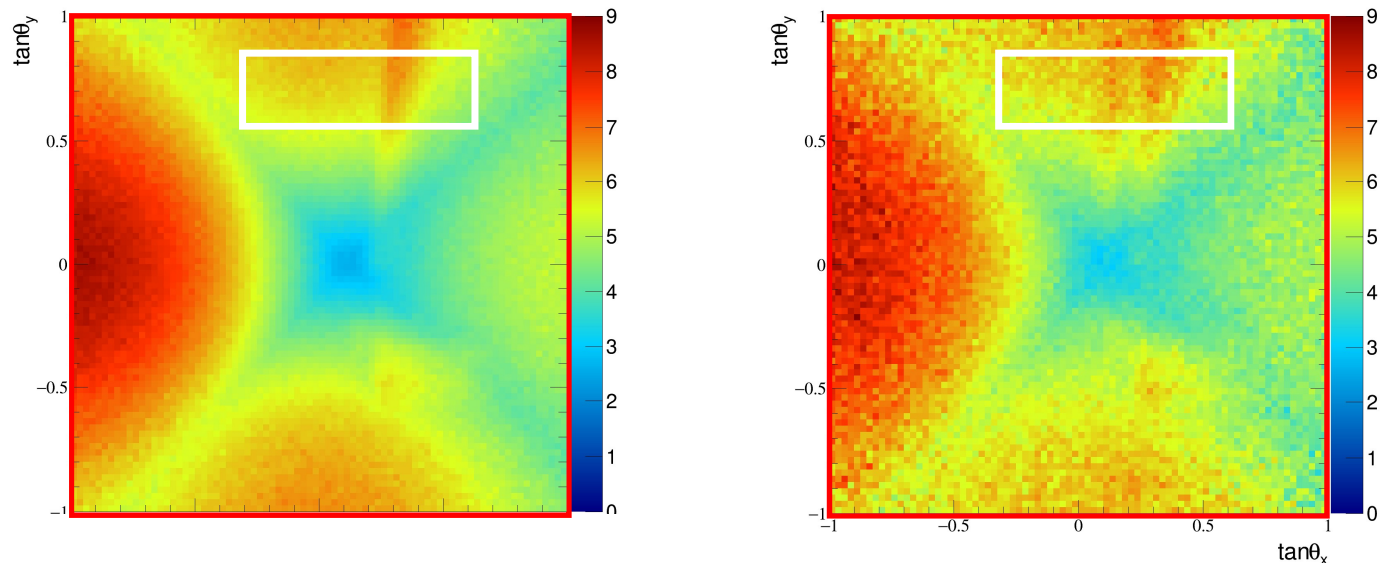
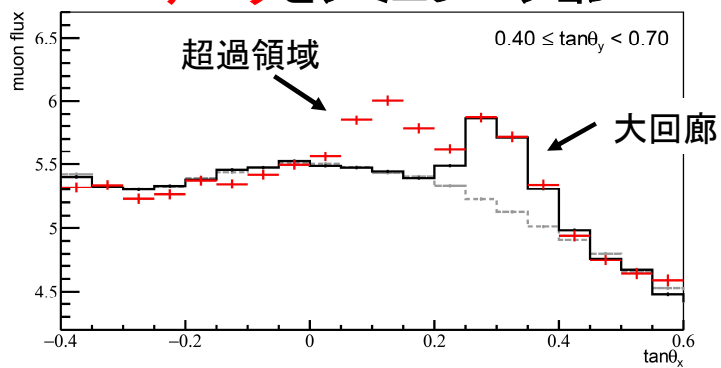


ヒストグラム

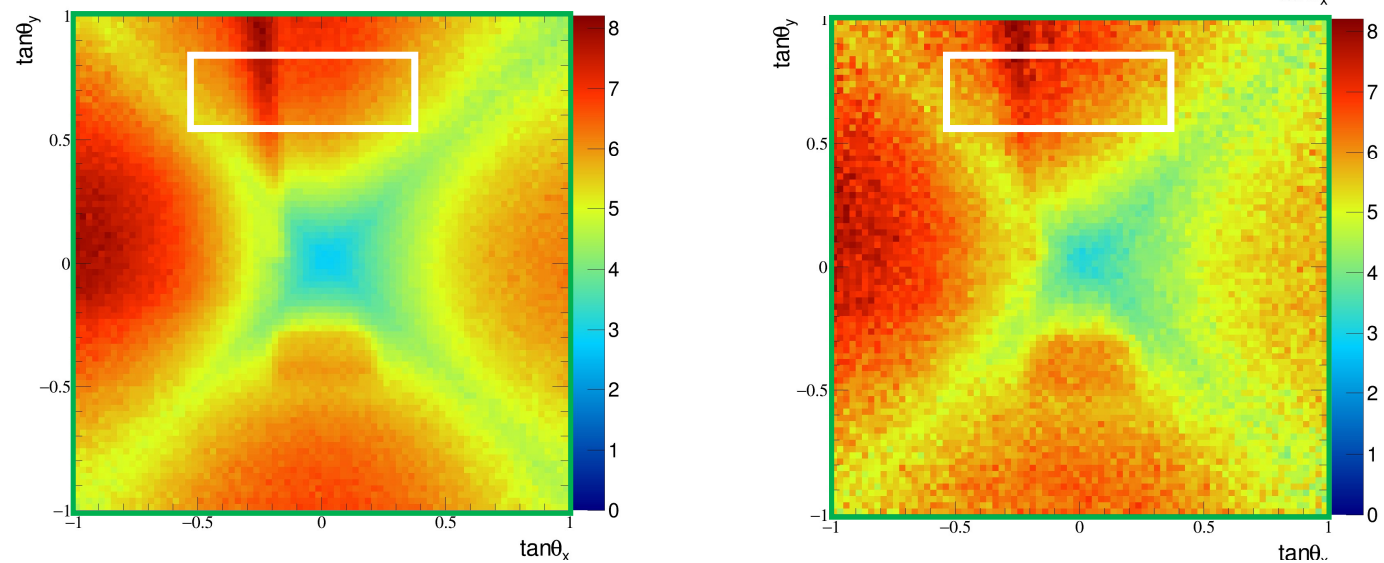
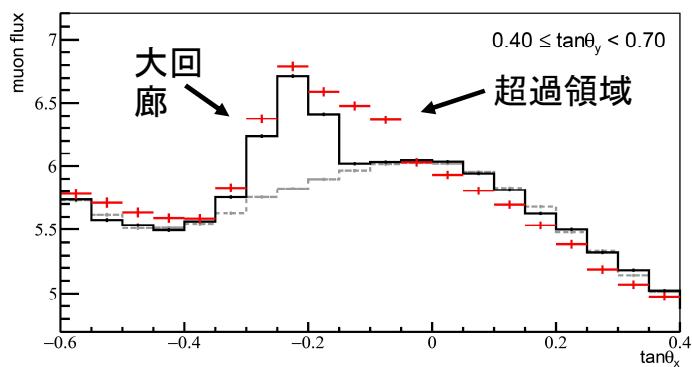
予想(1000日)

結果(150日)

データとシミュレーション



データとシミュレーション

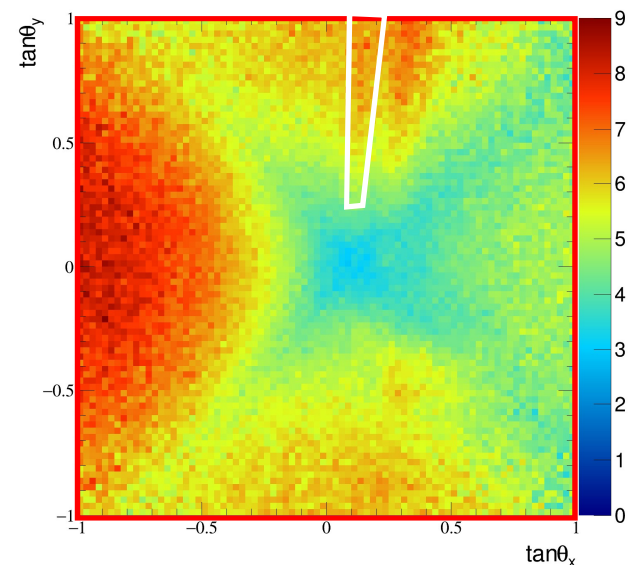
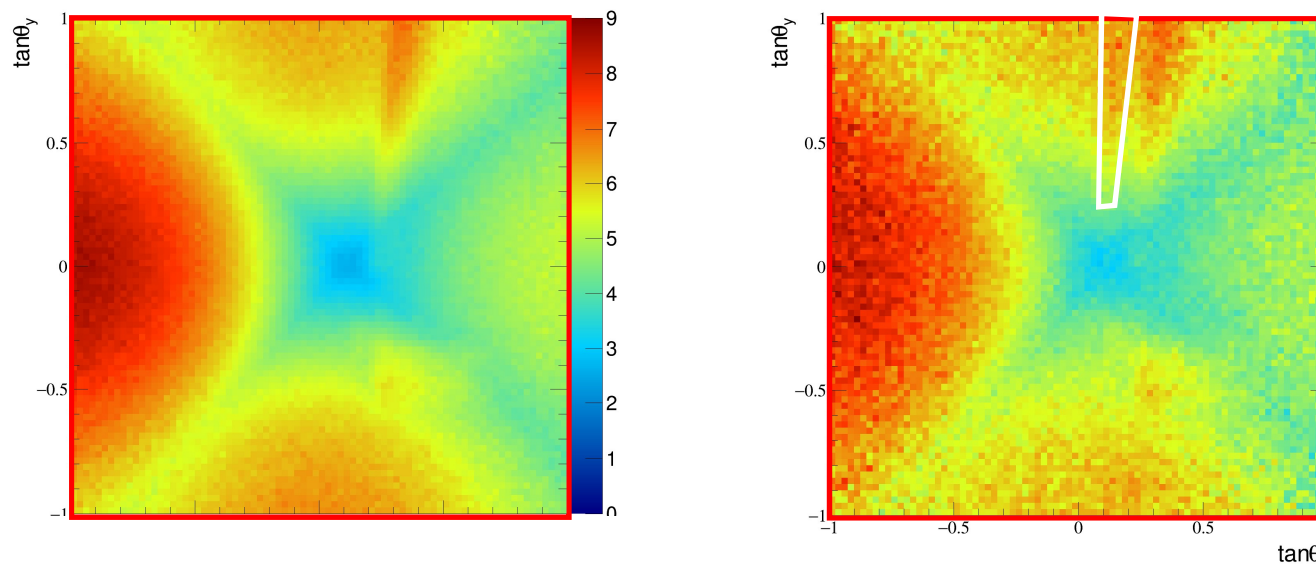
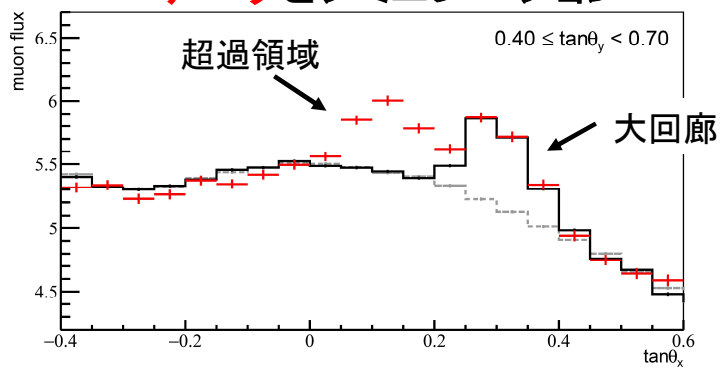


ヒストグラム

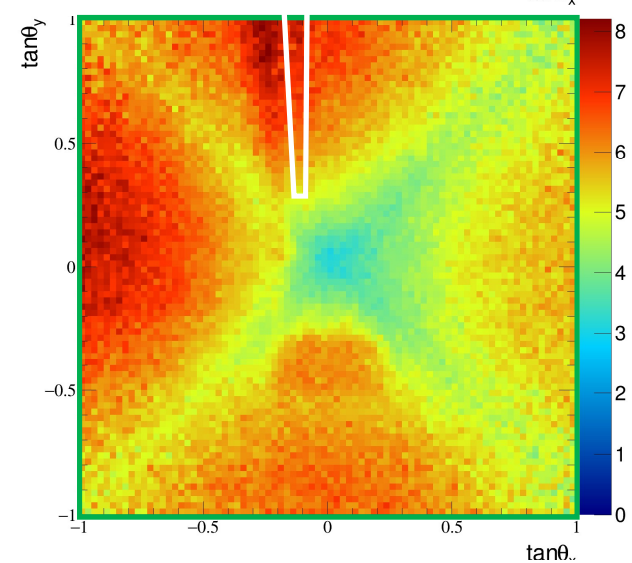
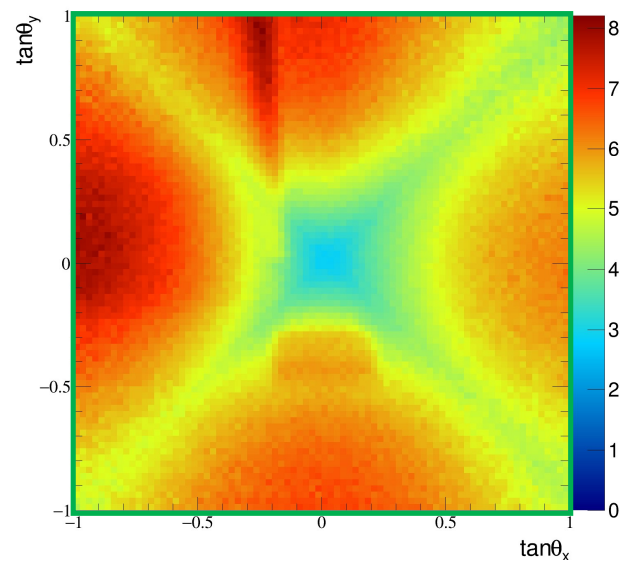
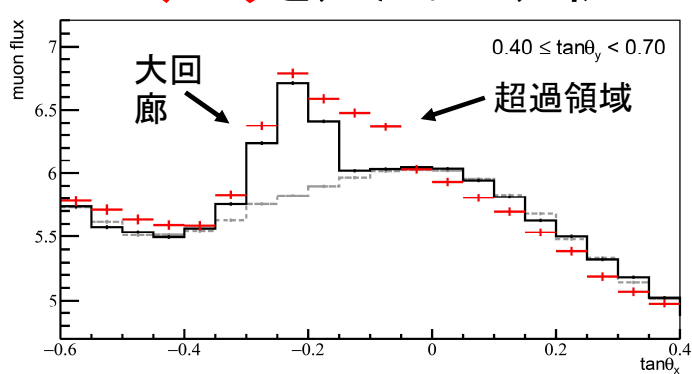
予想(1000日)

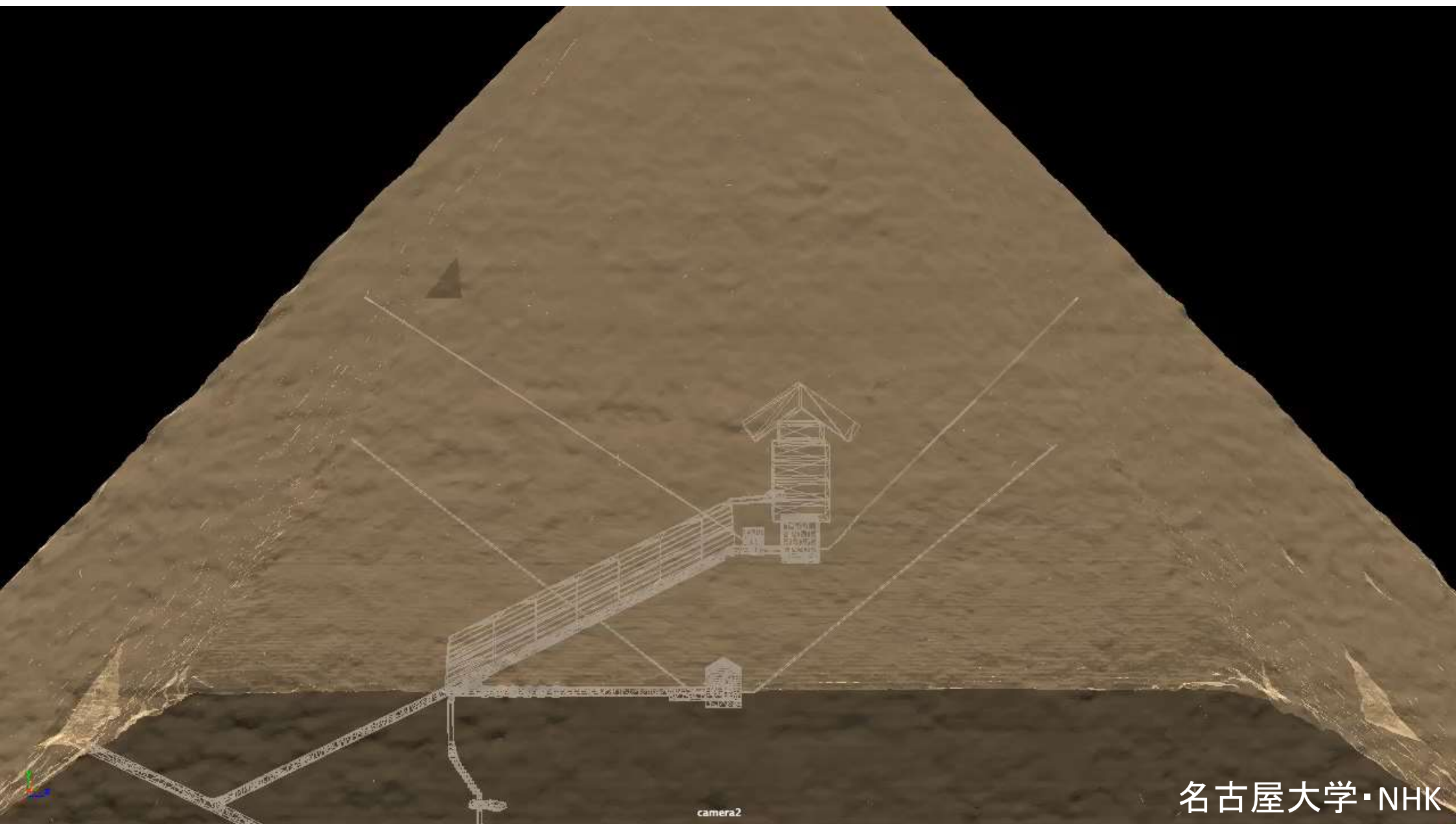
結果(150日)

データとシミュレーション



データとシミュレーション

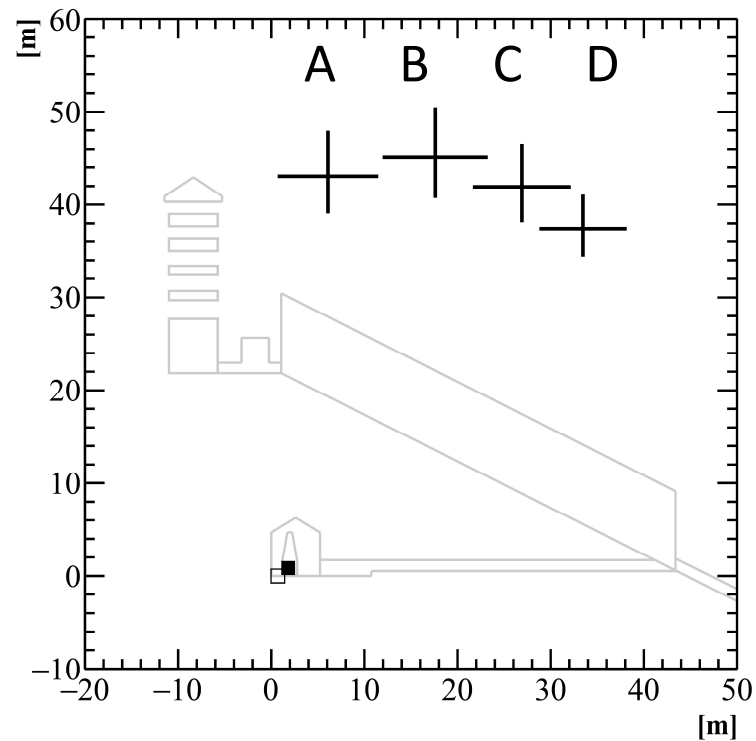




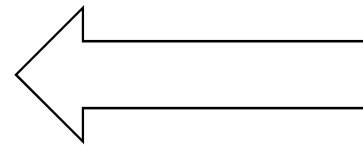
camera2

名古屋大学・NHK

空間の3次元位置の推定



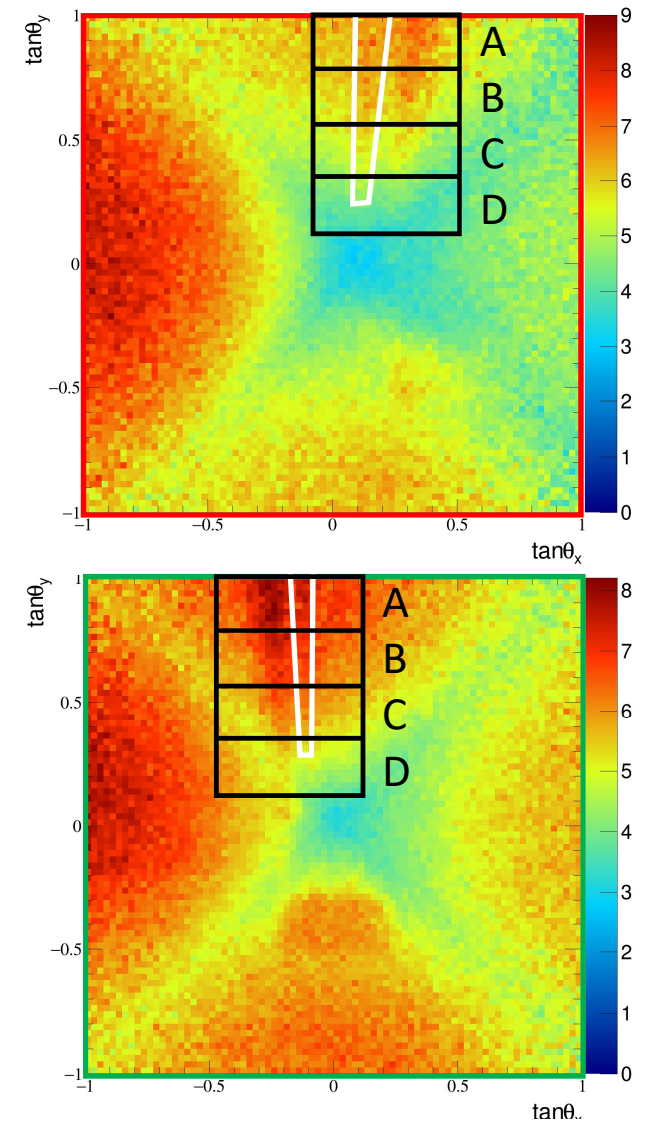
各領域(A~D)
ごとに三角測量



大回廊上部に未知の空間を検出！

- ・断面積は大回廊に匹敵
- ・南北方向の長さは30m以上
- ・女王の間の床面から40-50m上方に位置

結果



大回廊の上部に
巨大な空間を発見！



ScanPyramids Big Void

Grand Gallery

ScanPyramids
North Face Corridor

K. Morishima et. al., "Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons", Nature 552, 386 (2017)

©ScanPyramids

大回廊の上部に
巨大な空間を発見！



ScanPyramids Big Void

今後の課題：
新空間の形状を明らかにする

Grand Gallery

ScanPyramids
North Face Corridor

K. Morishima et. al., "Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons", Nature 552, 386 (2017)

©ScanPyramids

大回廊の上部に
巨大な空間を発見！



ScanPyramids Big Void

今後の課題：
新空間の形状を明らかにする

Grand Gallery

ScanPyramids
North Face Corridor

K. Morishima et. al., "Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons", Nature 552, 386 (2017)

©ScanPyramids

大回廊の上部に
巨大な空間を発見！



ScanPyramids Big Void

今後の課題：
新空間の形状を明らかにする

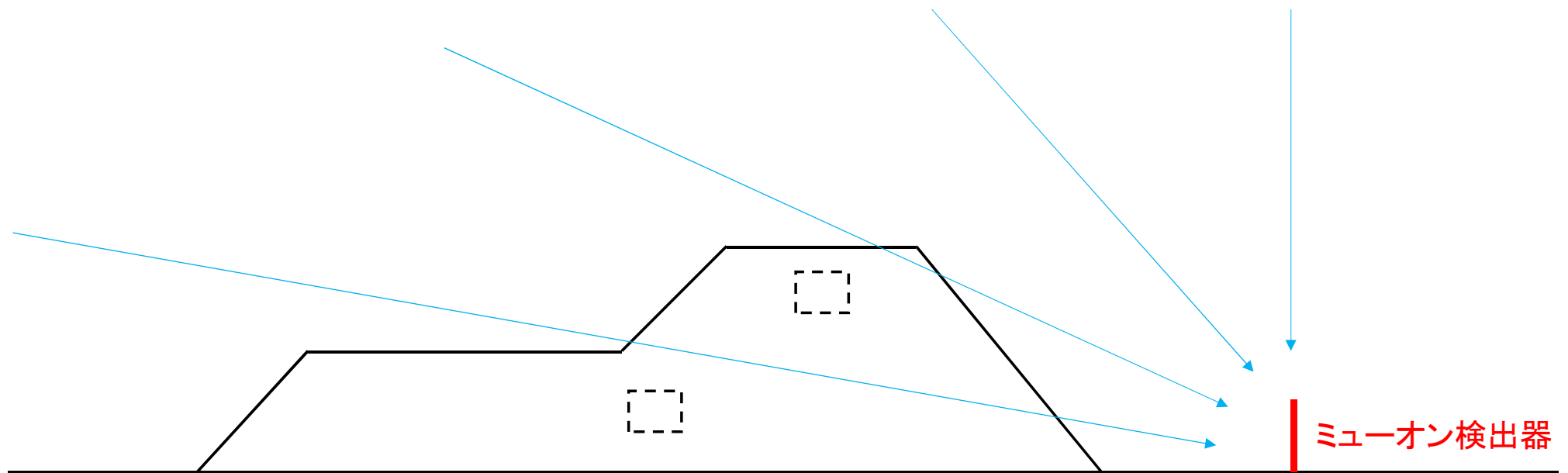
Grand Gallery

ScanPyramids
North Face Corridor

K. Morishima et. al., "Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons", Nature 552, 386 (2017)

©ScanPyramids

古墳の場合 エジプトのピラミッドのように既存の内部通路がない場合



お城(石垣)

名古屋城



熊本城



考古遺跡・文化財への適用

- 宇宙線ミューオンの高い透過力を利用した透過イメージング
- 検出器は原子核乾板
 - 高解像度
 - 電源不要、軽量、コンパクト、高い防水防塵性により設置場所を選ばない
→観測対象に接近出来る →高い分解能
- 実績
 - ピラミッド(上方向ミューオン): 100mの遺跡中から未知の空間を発見
→ 宇宙線トモグラフィ
 - 古墳: 20m(横方向ミューオン)
- 今後？
 - 城の石垣
 - 仏像