

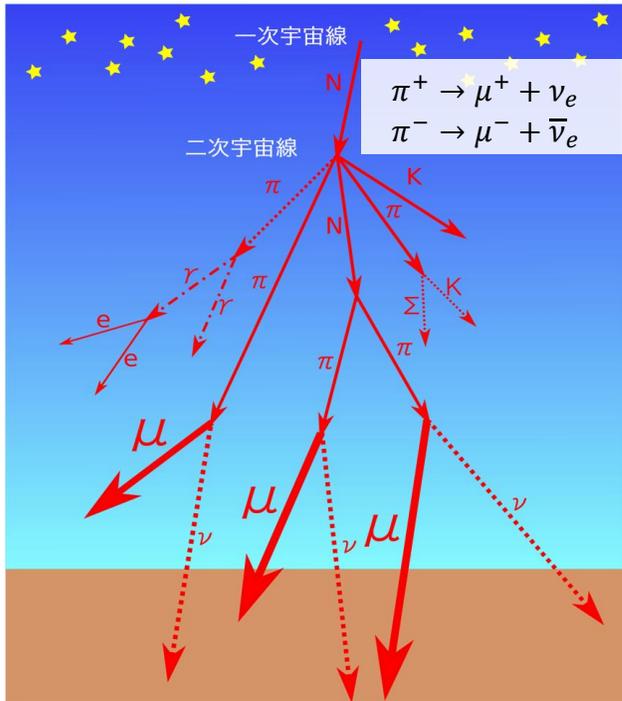
# 宇宙線イメージング考古学



森島邦博  
名古屋大学

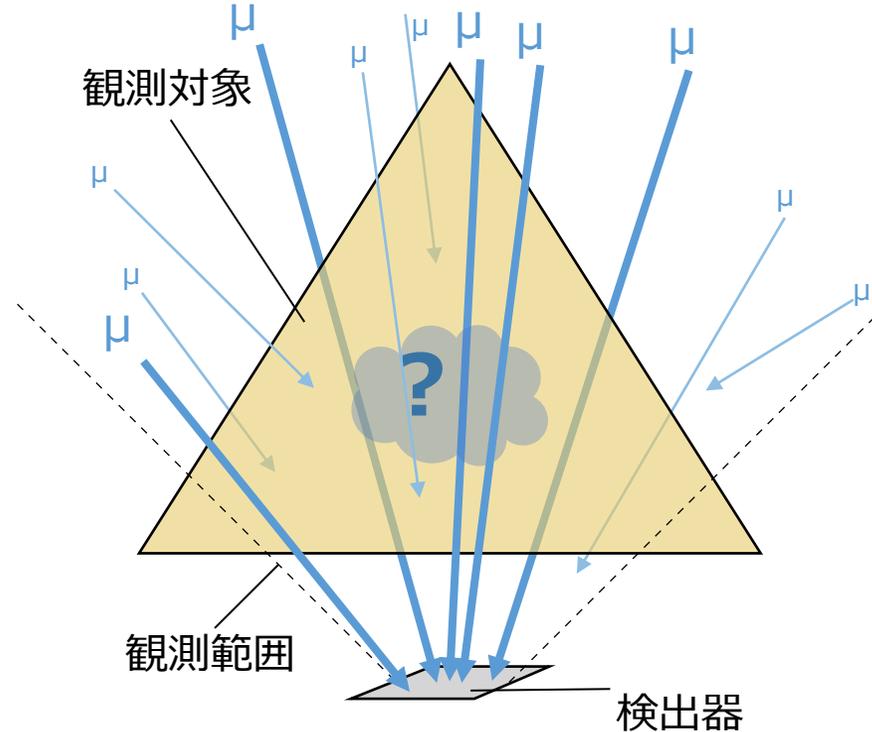
# 宇宙線ミュオンイメージング

## 宇宙線



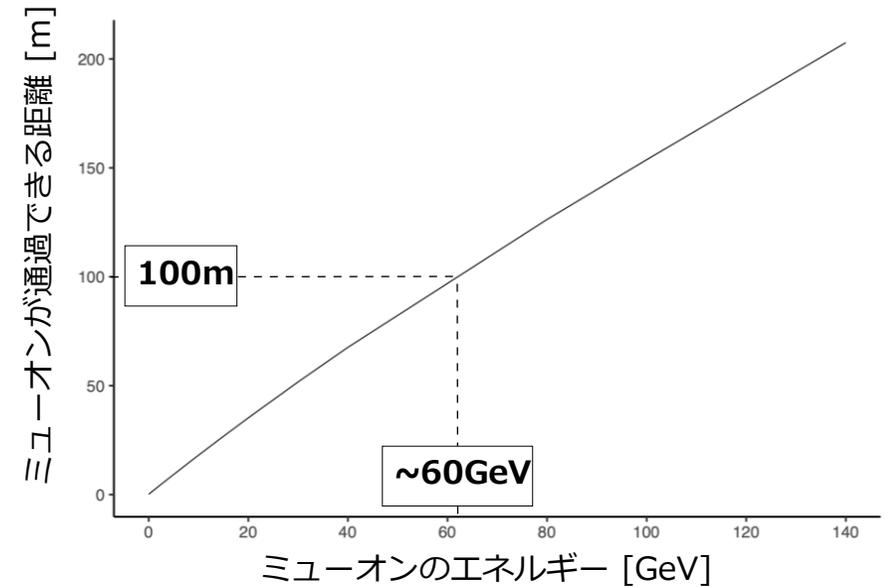
幅広いエネルギーの宇宙線  
ミュオンがあらゆる方向から  
飛来

## 宇宙線イメージングの概念図



観測対象を透過するミュオン  
を三次元飛跡検出器で検出

## 密度が2.65g/cm<sup>3</sup>の岩盤中の ミュオンの飛程



Groom, D. E. et al. (2001)

1TeVを超えるミュオンは1kmで  
さえも透過

# 宇宙線イメージングの対象

橋梁



遺跡調査



火山



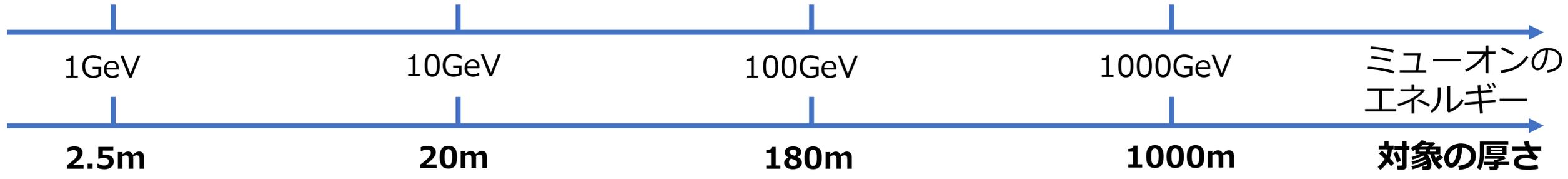
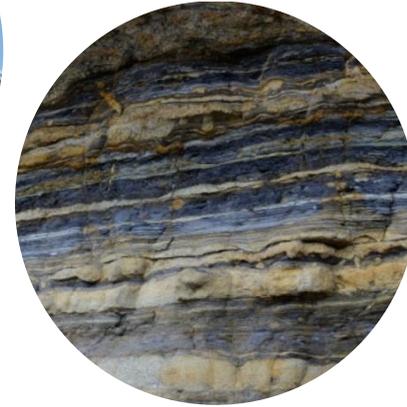
工業プラント



社会インフラ



地質・資源



多彩な分野への貢献

# 「素粒子現象から巨大構造物までを透視するマルチスケールミュオンイメージングの創成」

領域代表：森島

計画研究A02 原子核乾板によるピラミッド・火山の  
三次元ミュオンイメージングと対象の多彩化

ピラミッド (A02)

火山 (A02)

異分野融合

社会実装

起源探求  
(物質、文明)

加速器 (A04)

河川堤防 (A03)

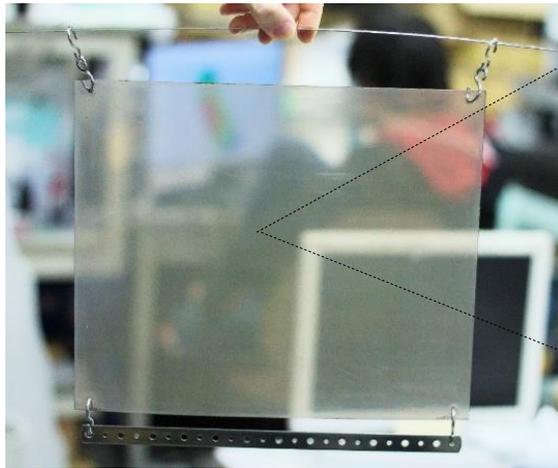
素粒子 (A01)

計画研究A03 河川堤防のミュオンイメージング：  
非破壊探査方法の革新と水-土の力学の深化

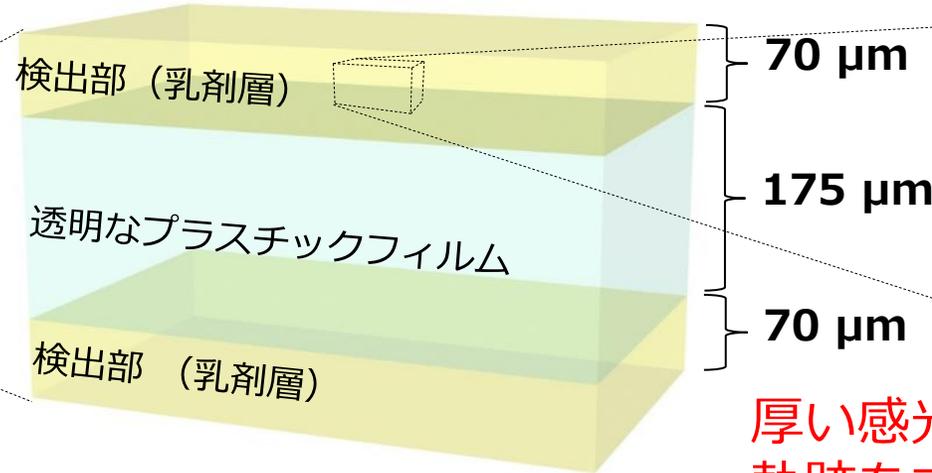


# 宇宙線を検出する写真フィルム「原子核乾板」

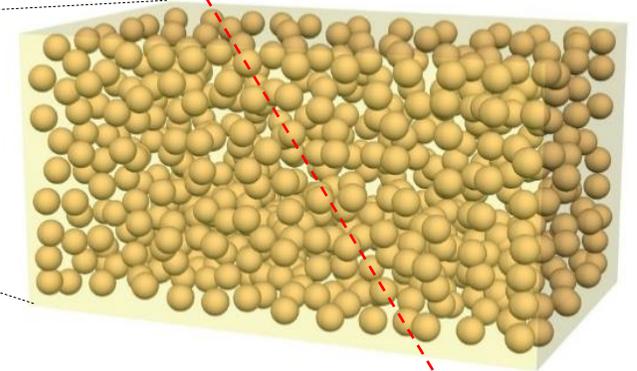
現像後の原子核乾板



断面図



臭化銀結晶  
(直径 200 nm)

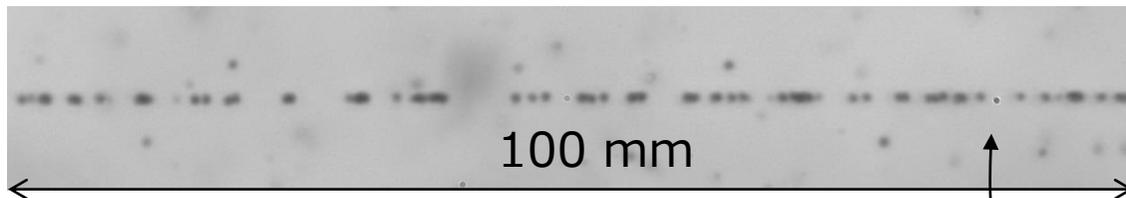
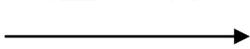


厚い感光層で放射線の軌跡を立体的に記録

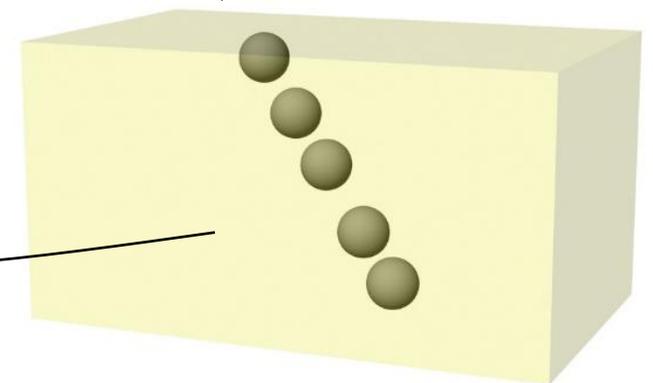
写真現像

記録されたミュオンの軌跡の光学顕微鏡画像

ミュオン



ミュオン



## 特徴

- ・ 軽量、コンパクト、防水・防塵仕様
- ・ 高い生産性による大面積化

# スキャンピラミッド ScanPyramids (2015年～)

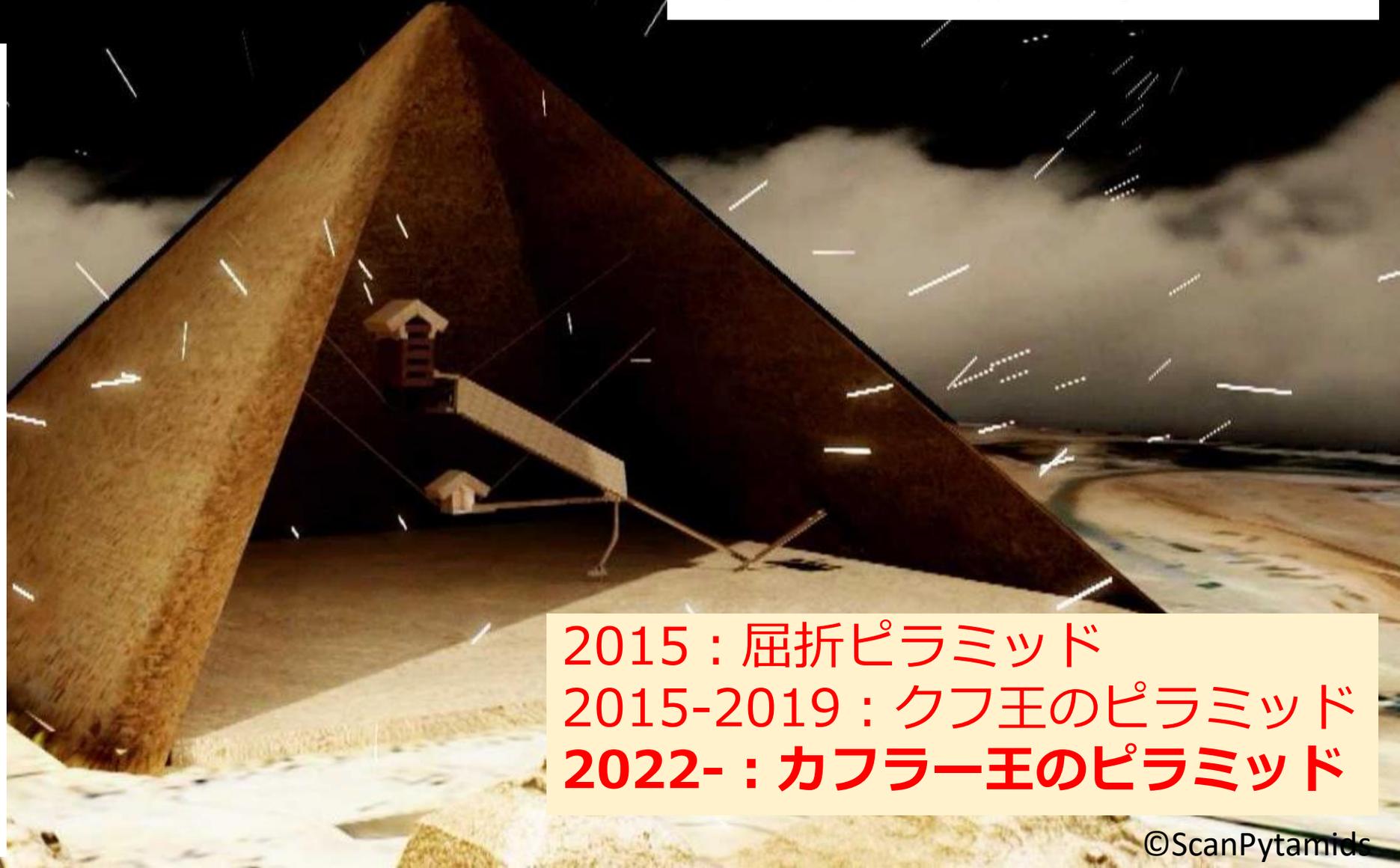
国際共同研究

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

名古屋大学独自の  
素粒子計測技術「原子核乾板」



2015：屈折ピラミッド

2015-2019：クフ王のピラミッド

2022-：カフラー王のピラミッド

# ピラミッド内部の新空間の発見 (2017年)

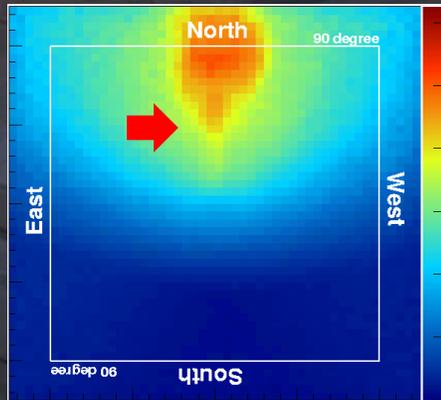
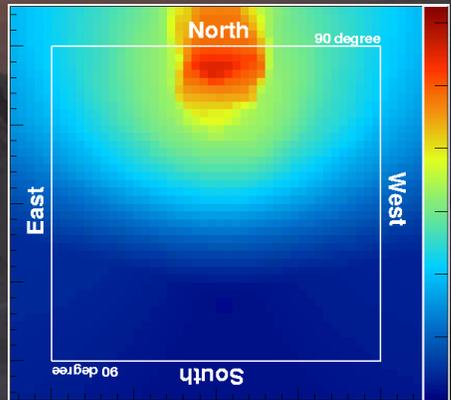
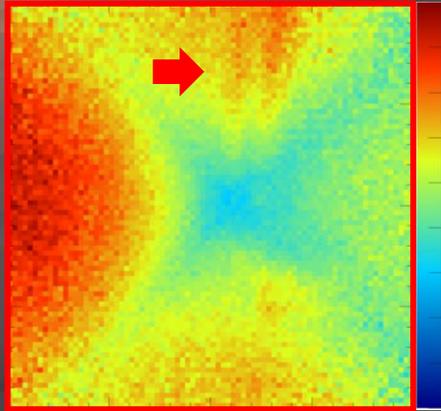
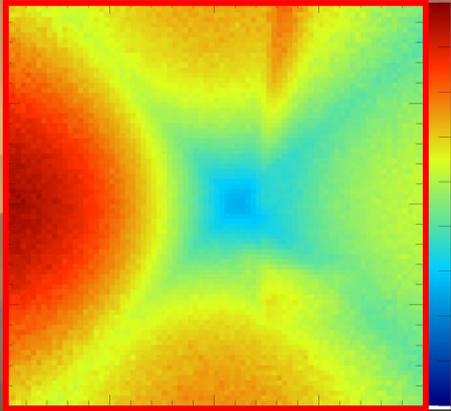
K. Morishima et. al., Nature 552, 386 (2017)

シミュレーションと観測データの間  
に有意な差を検出

19世紀以降初めての未知構造の発見

シミュレーション画像

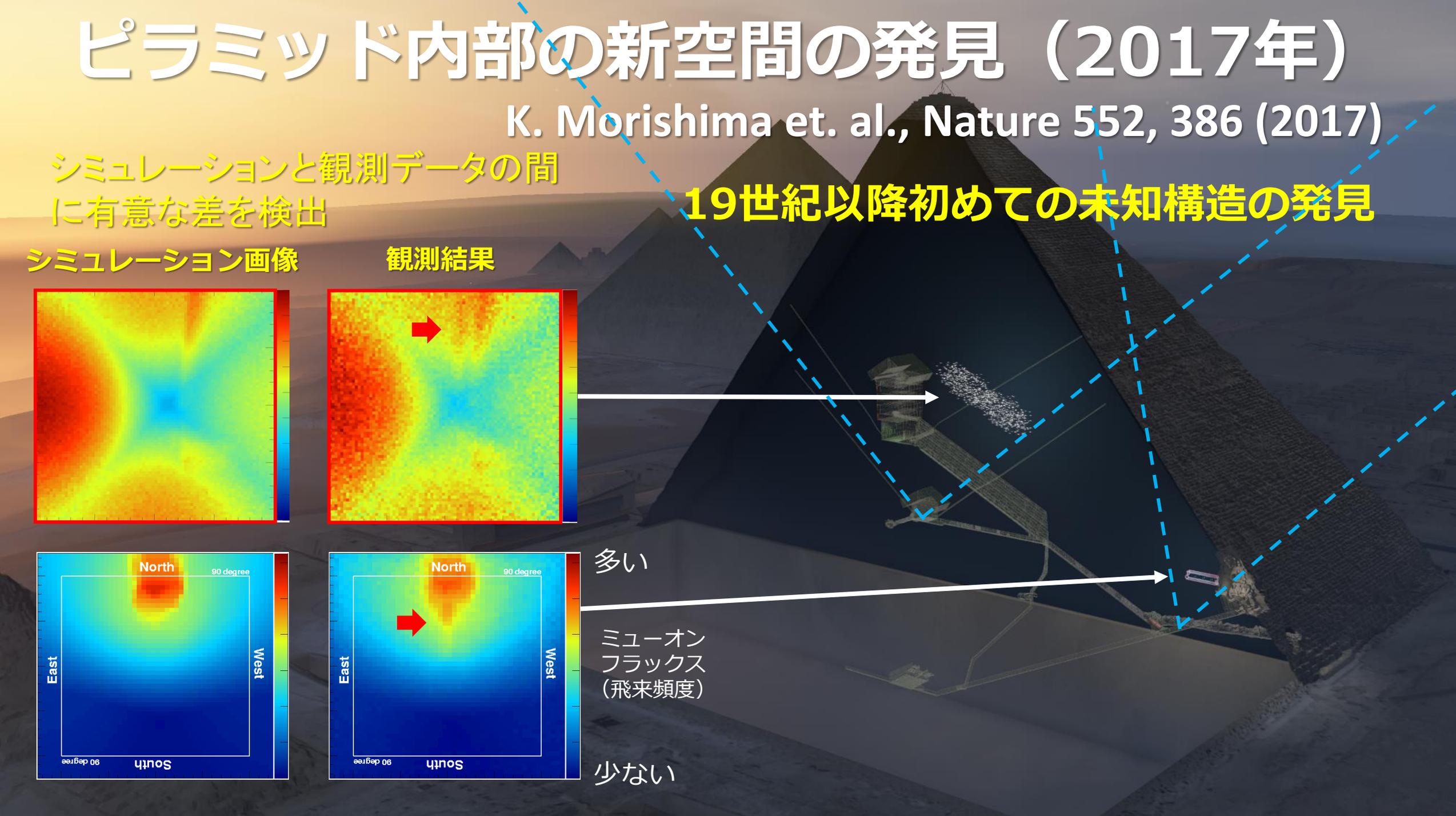
観測結果



多い

ミュオン  
フラックス  
(飛来頻度)

少ない



# ピラミッド内部の新空間の発見 (2017年)

K. Morishima et. al., Nature 552, 386 (2017)

19世紀以降初めての未知構造の発見

## 宇宙線イメージング考古学

- ・非破壊イメージングによる未知構造の検知
- ・遺跡に優しい最小限・効率的な発掘を可能にする
- ・文化遺産保護にも貢献

エジプト(ピラミッド)、マヤ(神殿)、イタリア(地下遺跡)をターゲットに展開・発展

重量軽減の間の3地点



# スキャンピラミッドの現状

- ① 多地点・多方向からの同時観測による三次元空間形状の解明
- ② 地下の間からのピラミッド全体の観測



大回廊の9地点

下降通路およびアルマムーンの通路の7地点



①-1 巨大空間

①-2 北面背後の通路状空間

● 2019年度の観測位置

● ② 地下の間

# スキャンピラミッドの現状

大回廊の9地点

①多地点・多方向からの同時観測による  
三次元空間形状の解明

②地下の間からのピラミッド全体の観測

①-1巨大空間

①-2.北面背後の  
通路状空間

下降通路

②地下の間

アルマムーンの通路

原子核乾板  
検出器

7地点からの観測データによる三次元形状推定  
→ 論文アクセプト (Nature Comm.)、近日公表

# ピラミッドの北面

## 切妻構造

- 空間の位置を特定により、切妻構造背後の空間の位置を10cmの精度で推定することに成功
- 透過型宇宙線イメージングにおける最高精度



# ピラミッドの北面

- 空間の位置を特定により、切妻構造背後の空間の位置を10cmの精度で推定することに成功
- 透過型宇宙線イメージングにおける最高精度



宇宙線イメージングの結果の確認のため、ミュンヘン大学によるレーダー探査を実施

**宇宙線イメージングにより発見した新空間の発掘調査へ**

# スキャンピラミッドの現状

- ① 多地点・多方向からの同時観測による三次元空間形状の解明
- ② 地下の間からのピラミッド全体の観測

①-1 巨大空間

①-2 北面背後の  
通路状空間

② 地下の間

女王の間の周辺とより深い領域の探査

● 原子核乾板  
検出器

2.25m<sup>2</sup>検出器

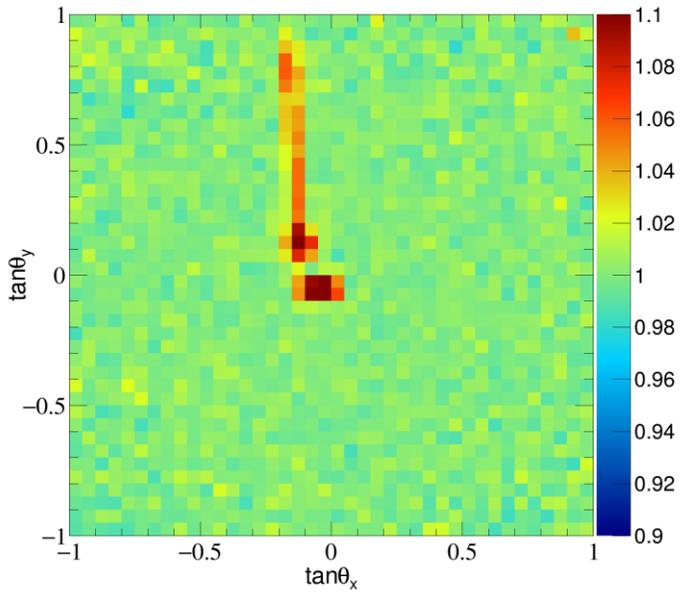


# 女王ピラミッドの現状

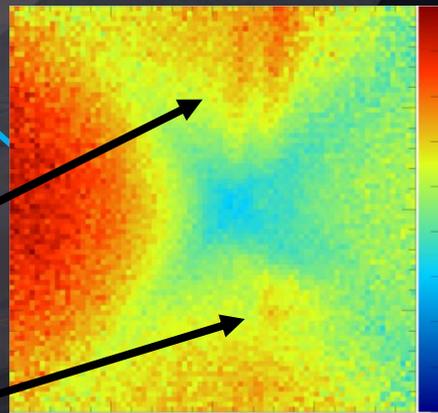
① 多地点・多方向からの同時観測による  
三次元空間形状の解明

② 地下の間からのピラミッド全体の観測

45日間相当のシミュレーション



45日間の観測データ



①-1 巨大空間

①-2 北面背後の  
通路状空間

② 地下の間

女王の間の周辺とより深い領域の探査

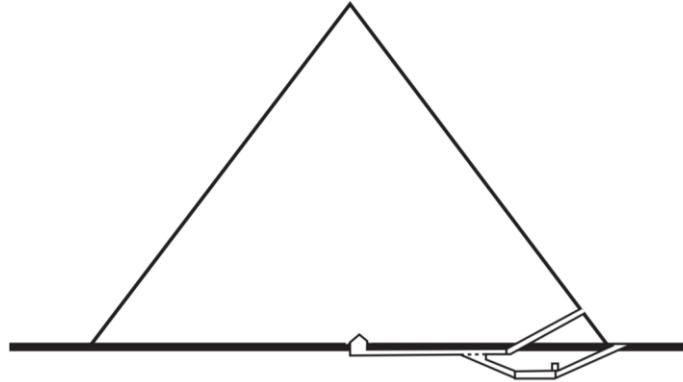
# カフラー王のピラミッド



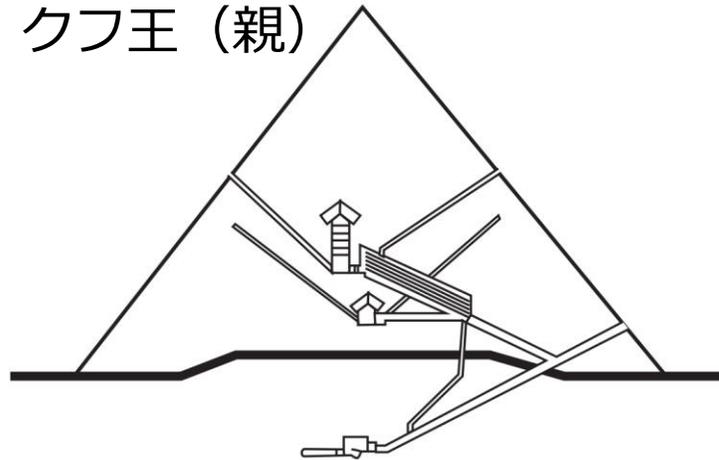
# カフラー王のピラミッド (2022-)



カフラー王 (子)

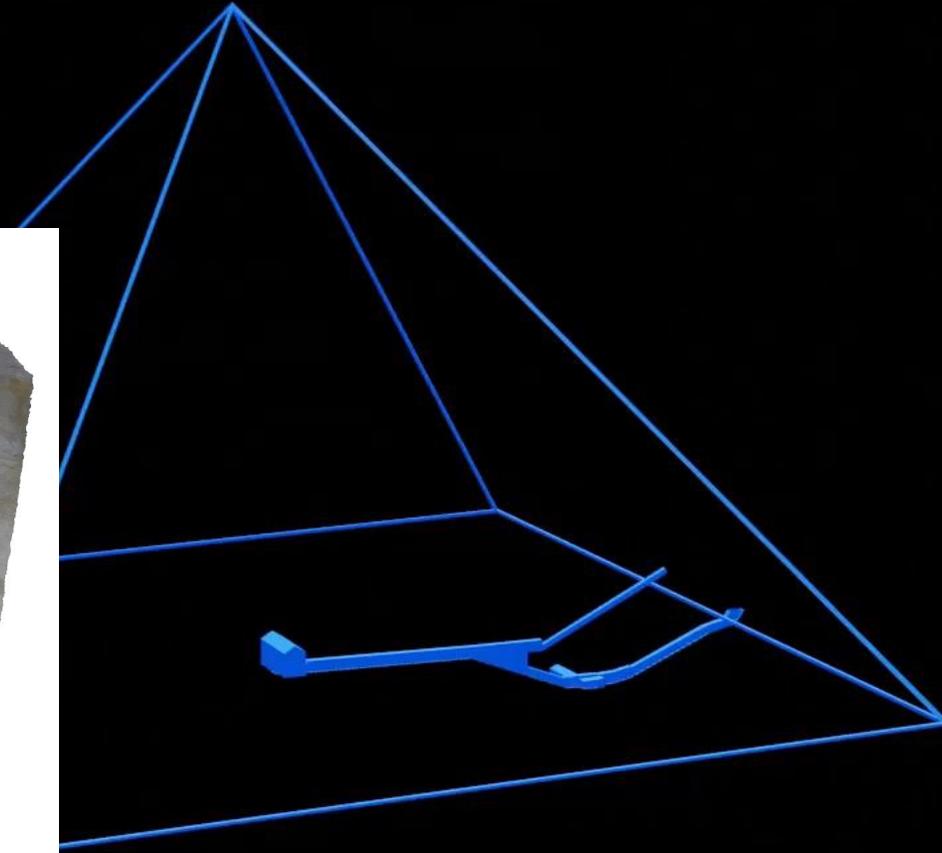
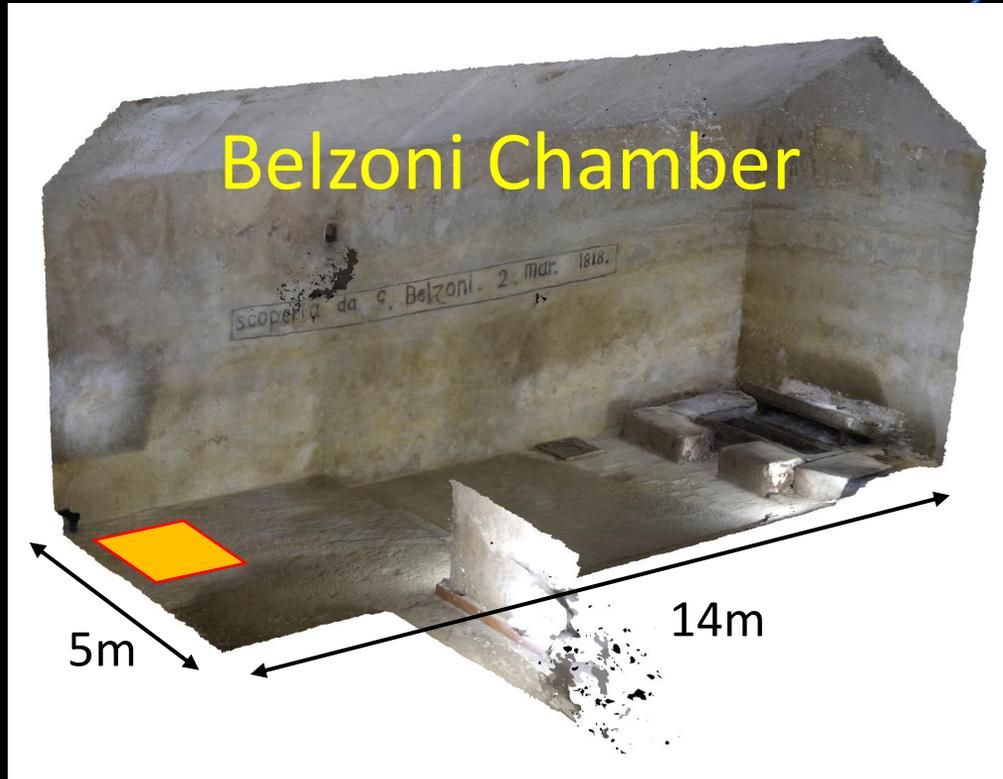


クフ王 (親)

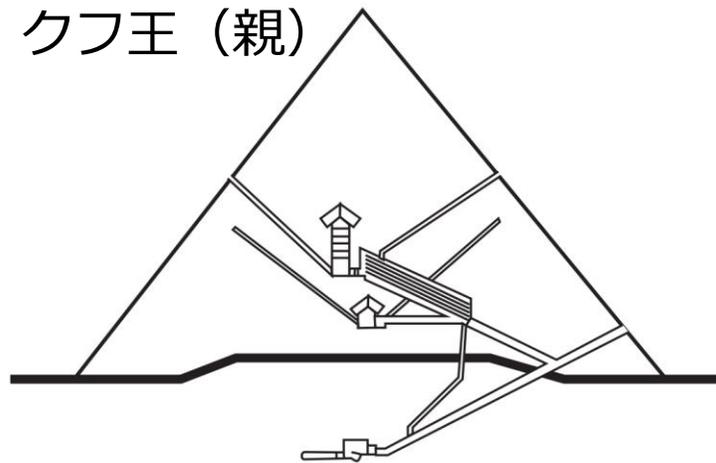
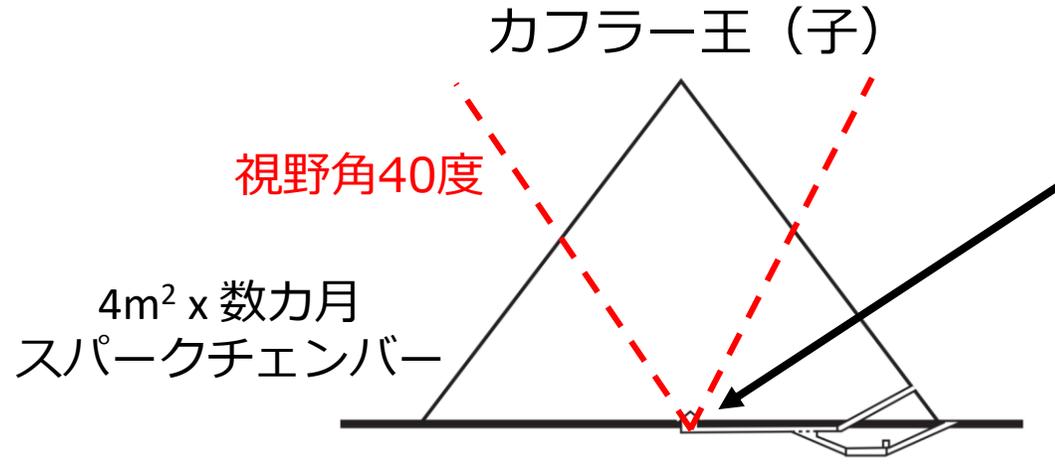
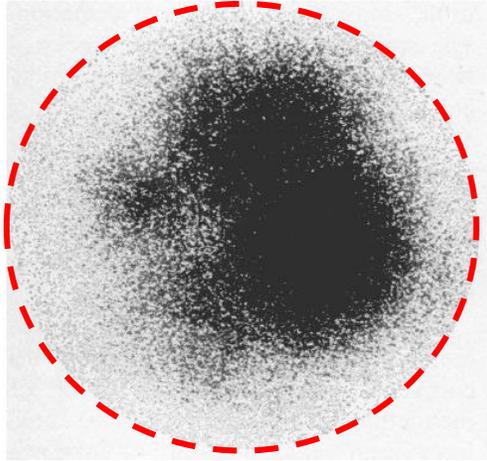


カフラー王のピラミッドにもクフ王と同じような複雑な内部構造が存在するのではないか？

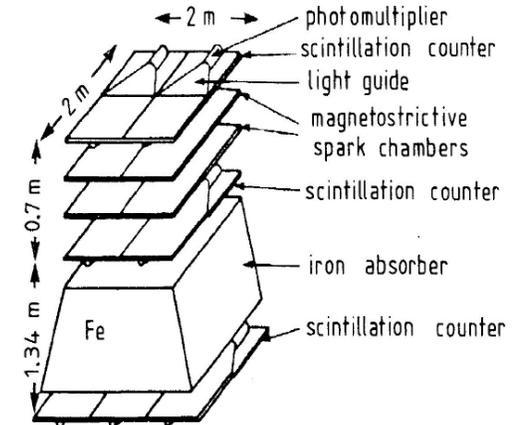
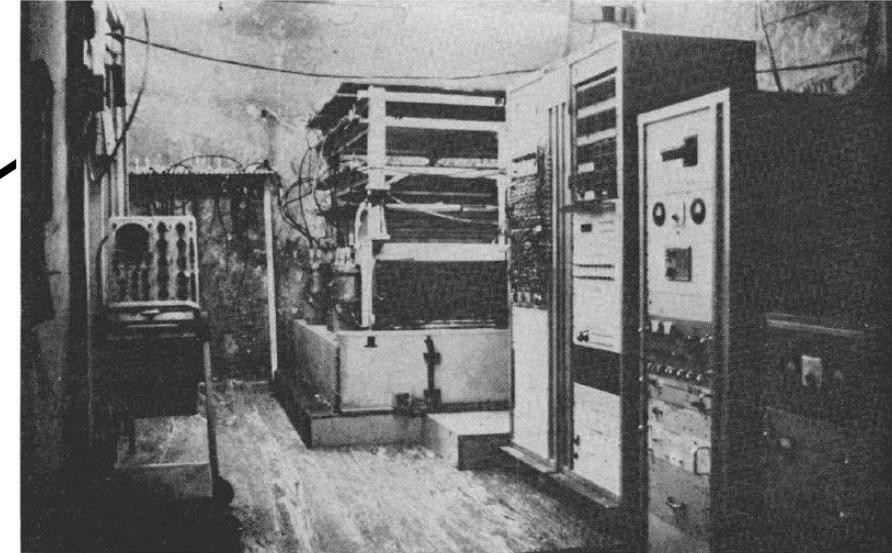
# カフラー王のピラミッド



# カフラー王のピラミッド (2022-)

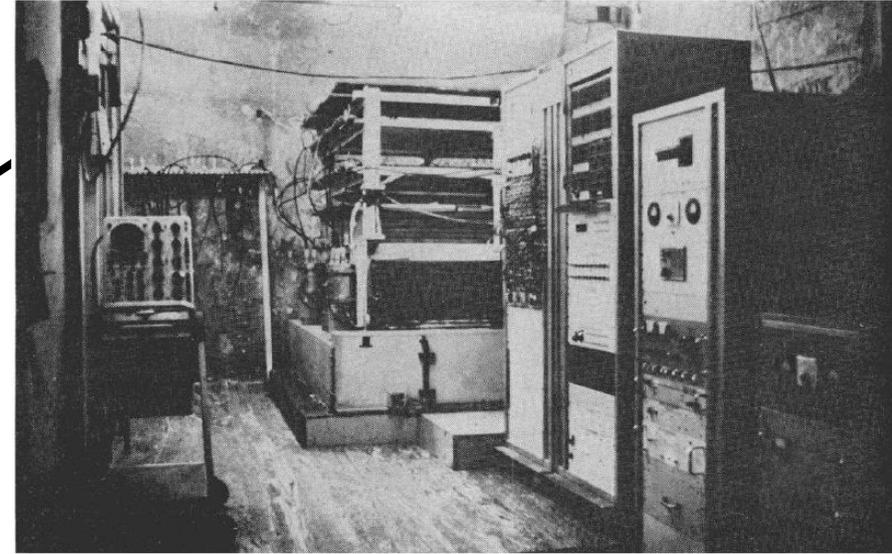
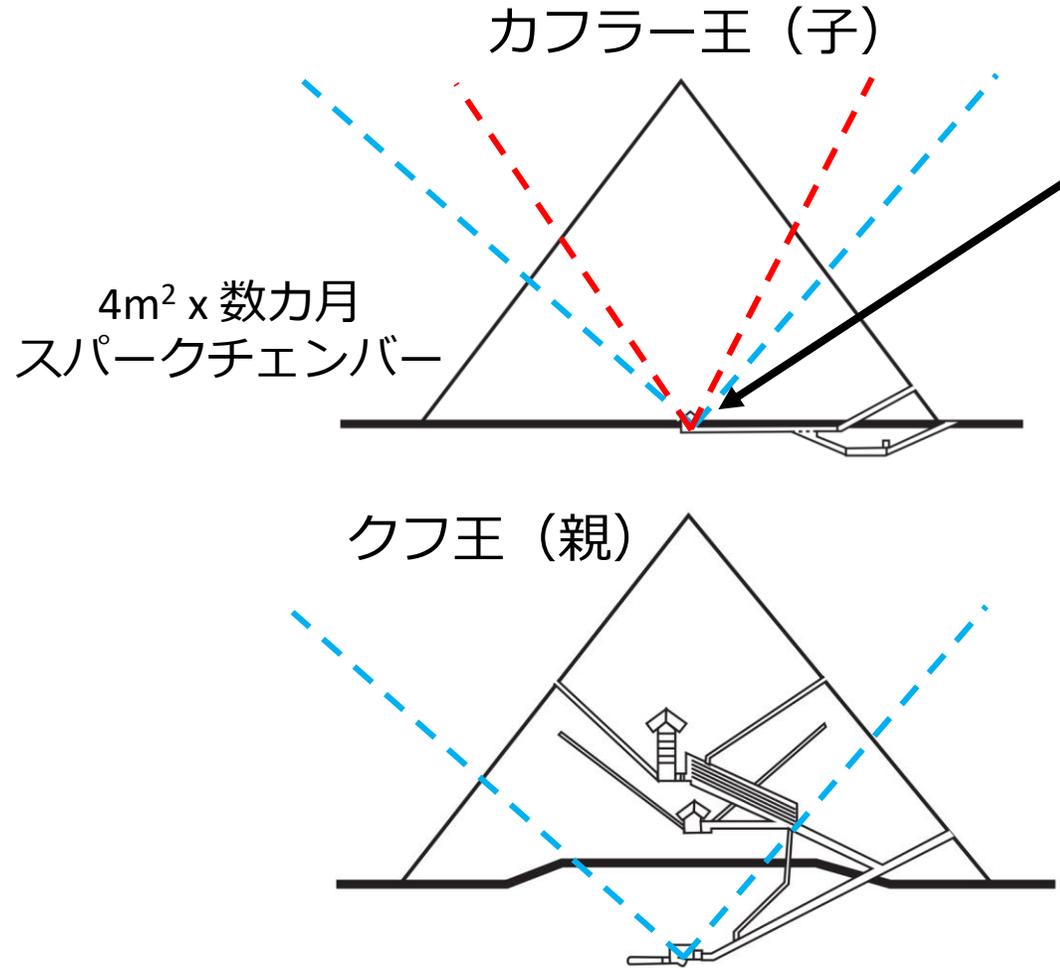
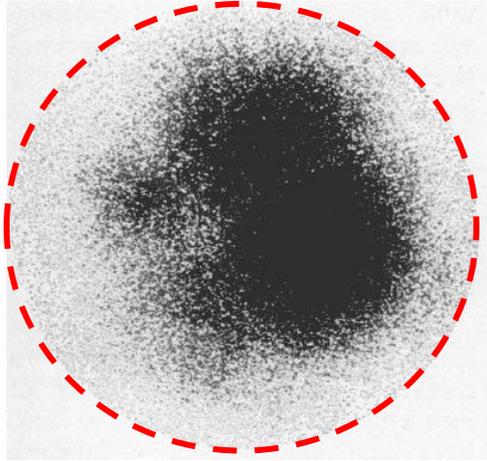


L.W.Alvarezらによる観測 (1970)



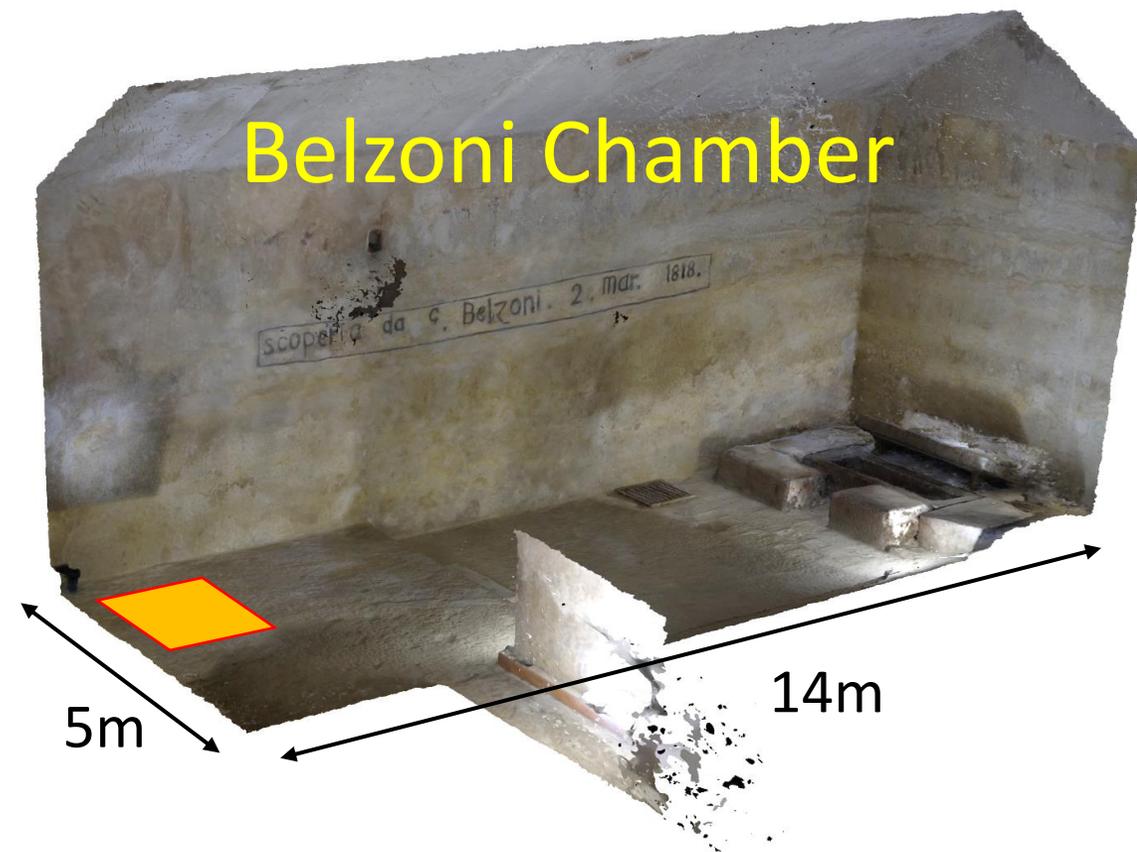
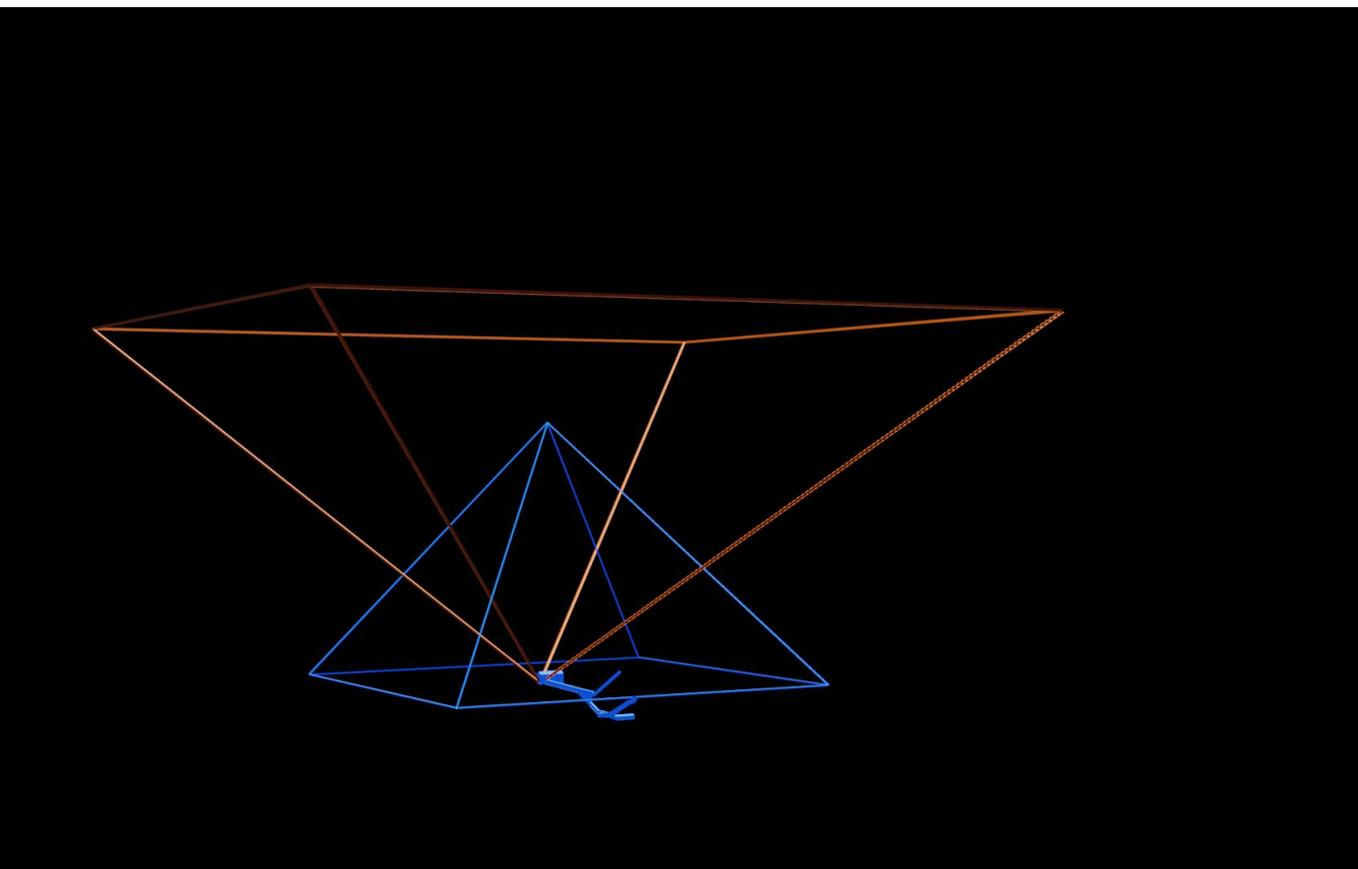
Alvarezらの観測 (1970) では、未知の空間は確認されていない

# カフラー王のピラミッド (2022-)

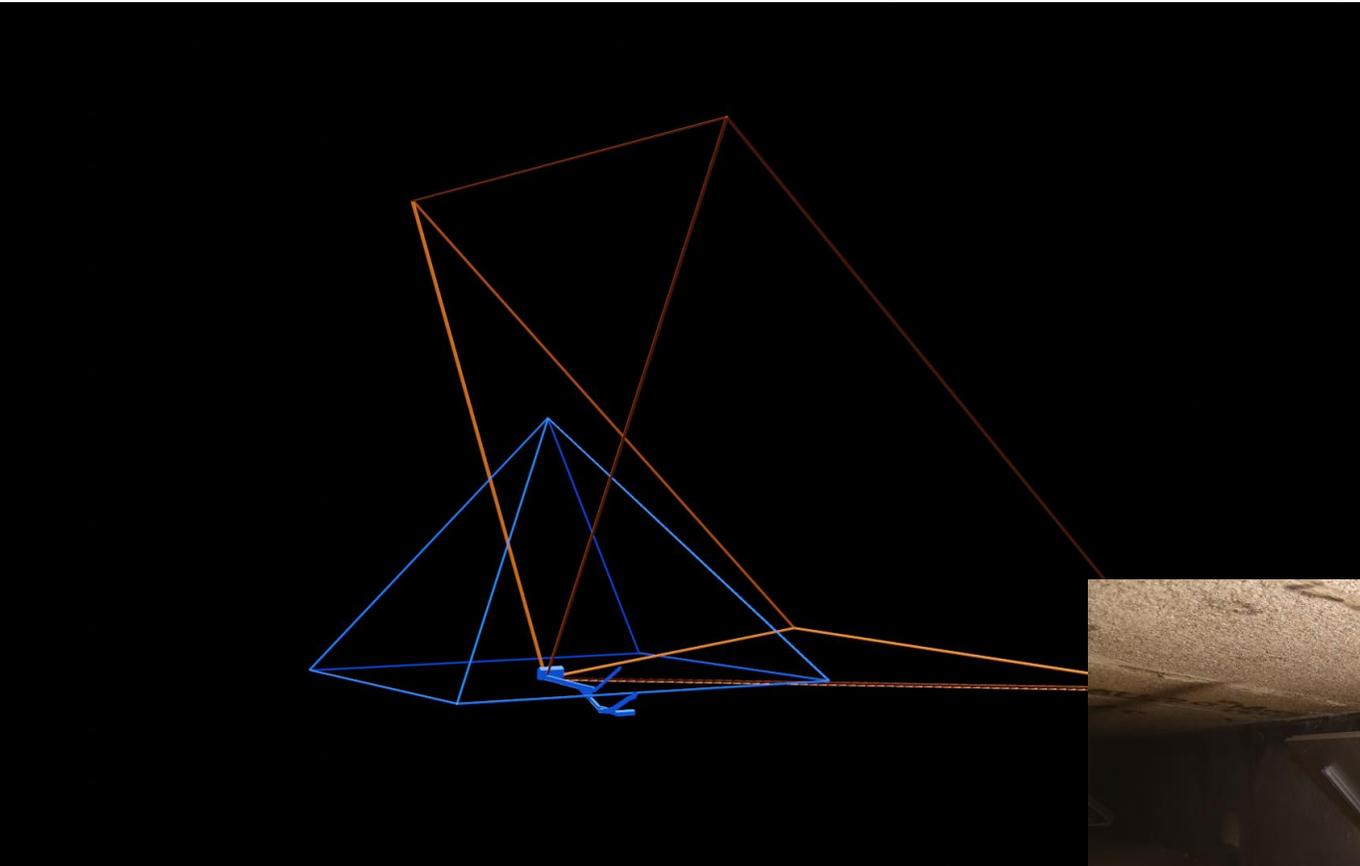
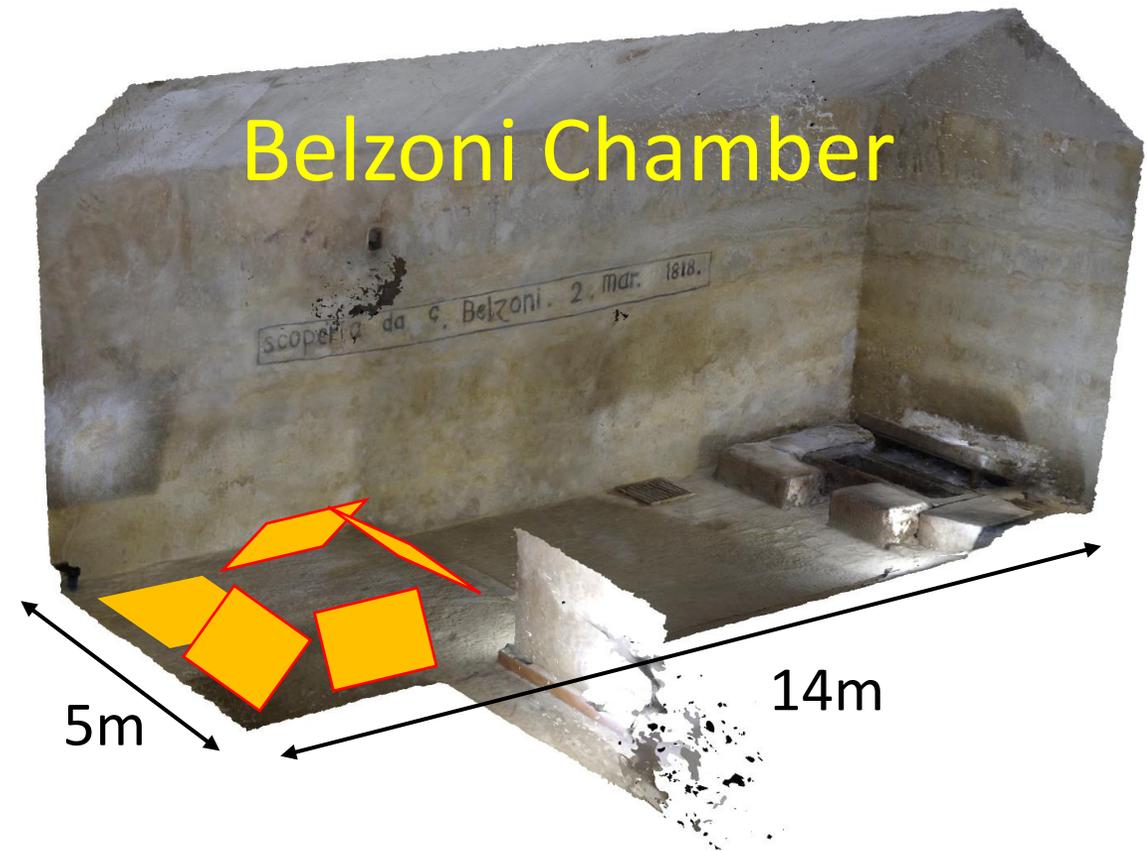


Alvarezらが可視化していなかった範囲に可視化範囲を拡張

Alvarezらがスパークチェンバーを  
観測した場所に原子核乾板を設置  
2022年10月13日

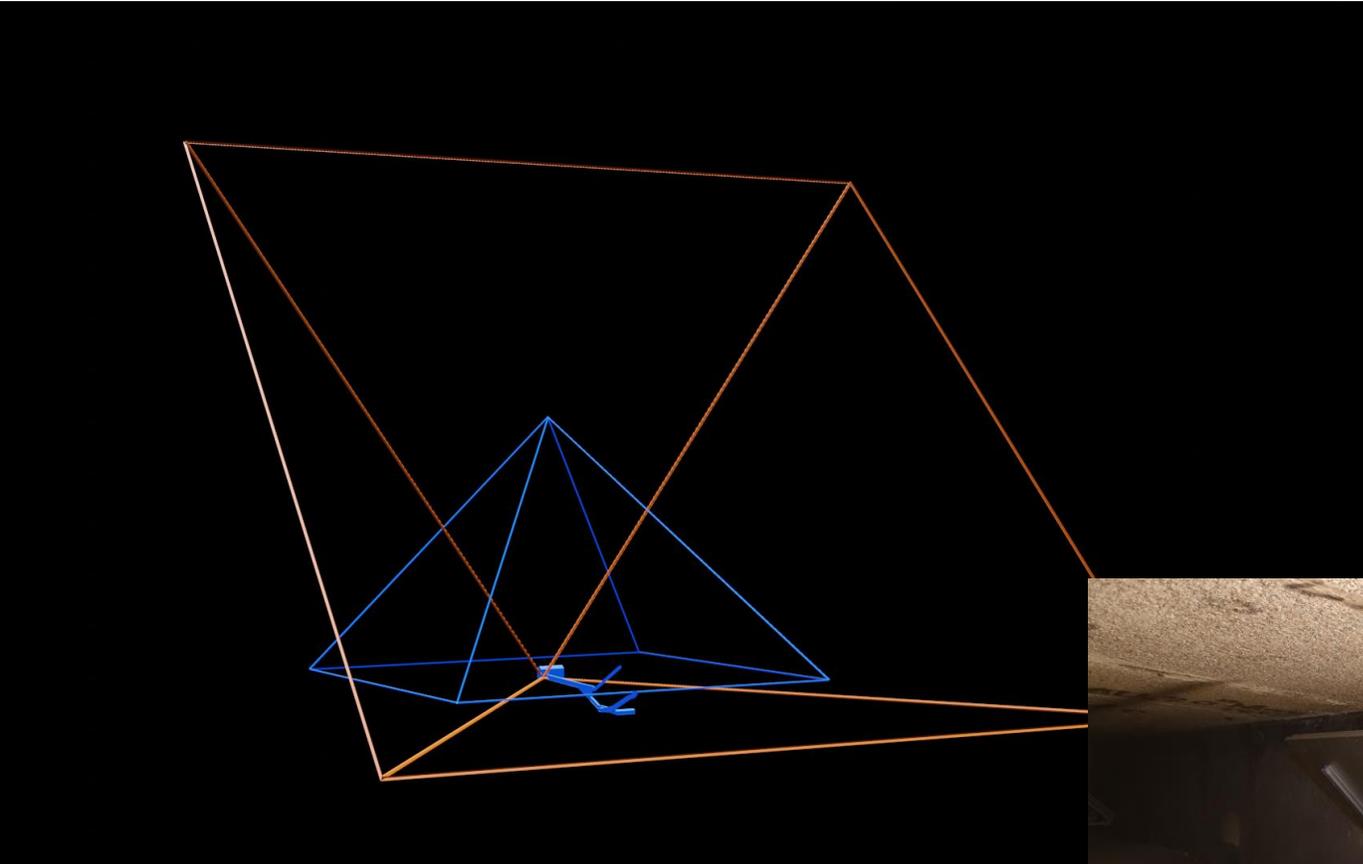
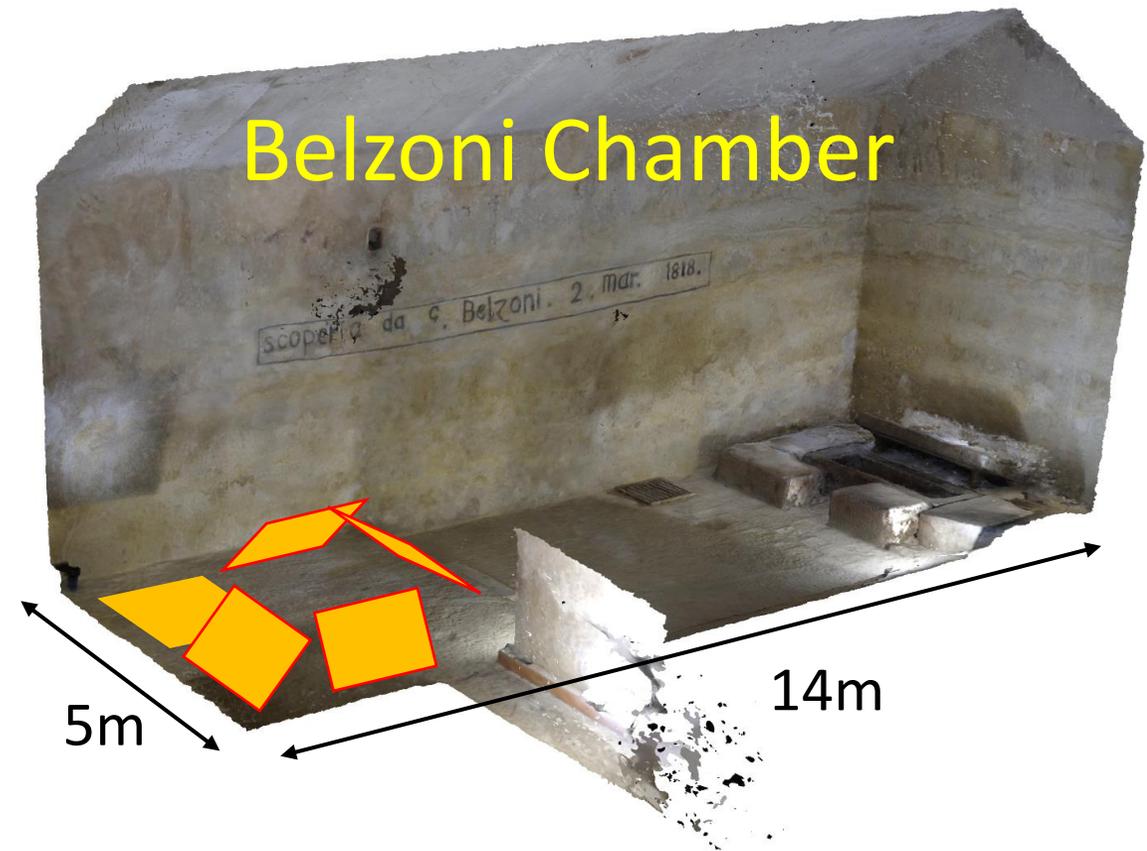


# 水平検出器と斜め45度の検出器 により全方位を探查（今後）



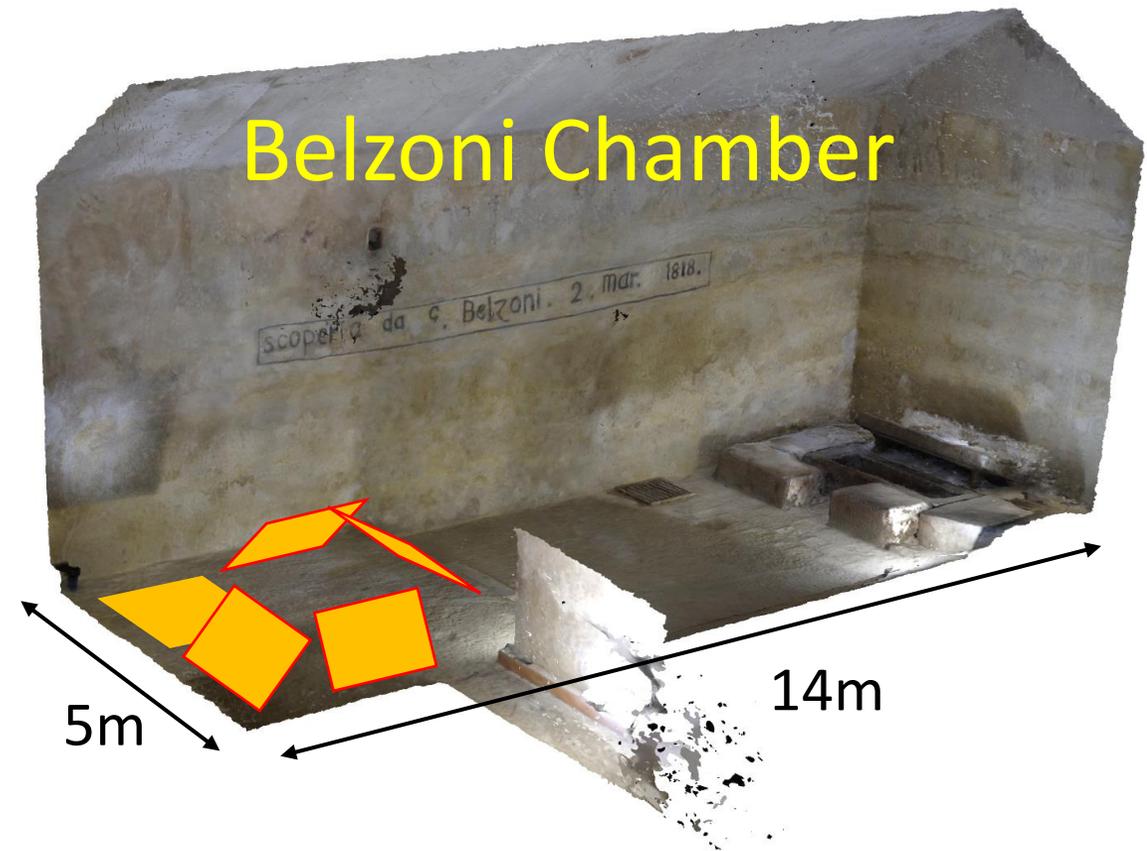
クフ王のピラミッドに  
設置した検出器

# 水平検出器と斜め45度の検出器 により全方位を探查（今後）



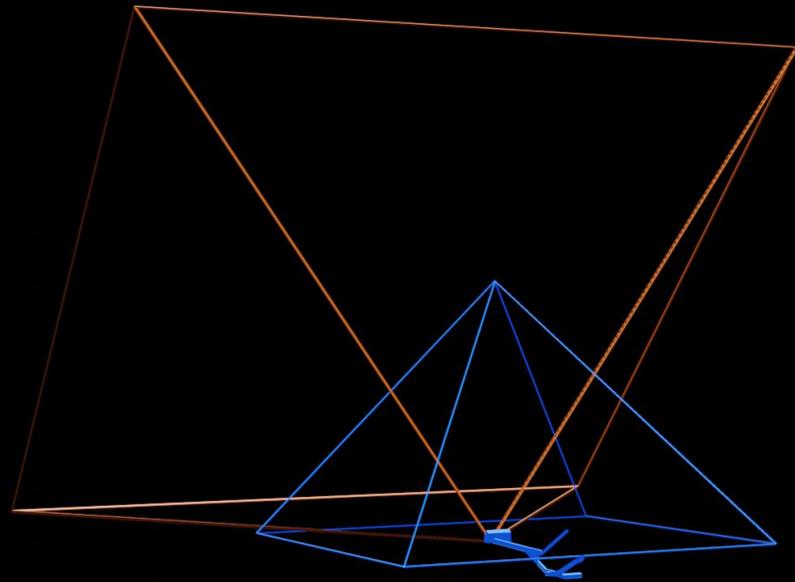
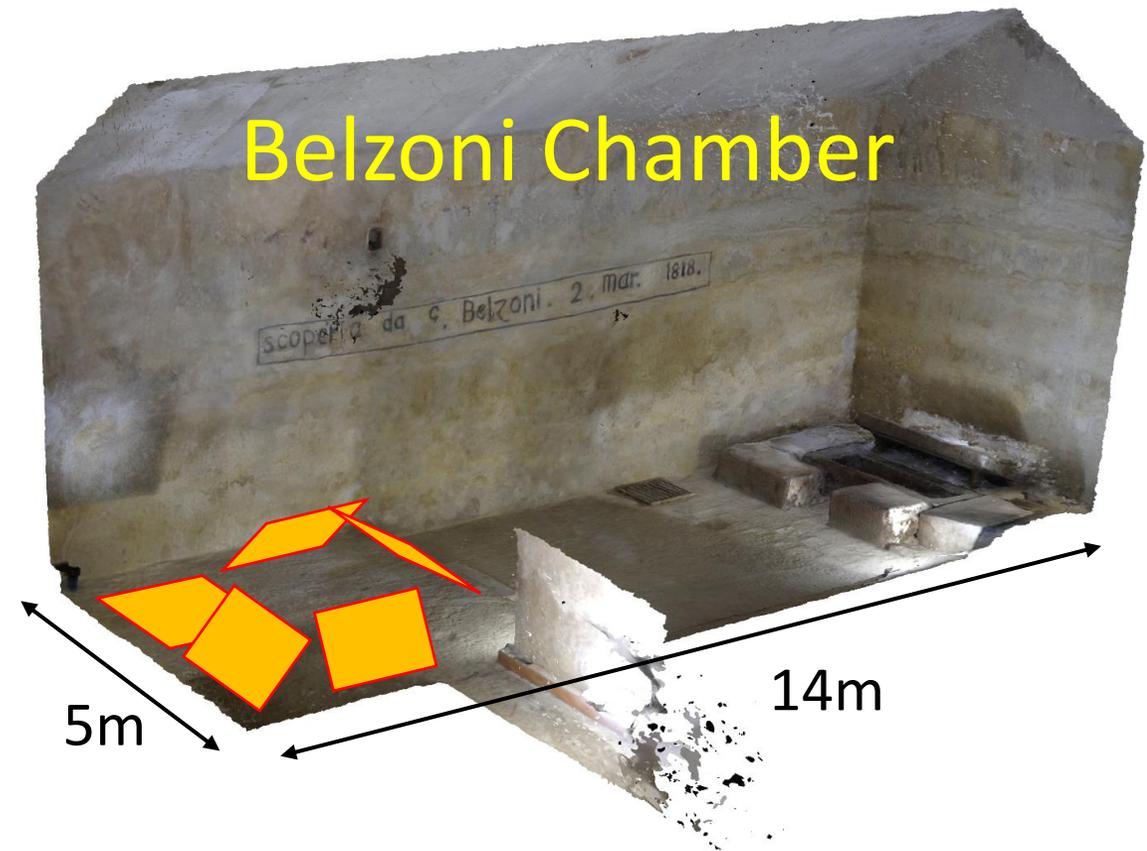
クフ王のピラミッドに  
設置した検出器

# 水平検出器と斜め45度の検出器 により全方位を探查（今後）



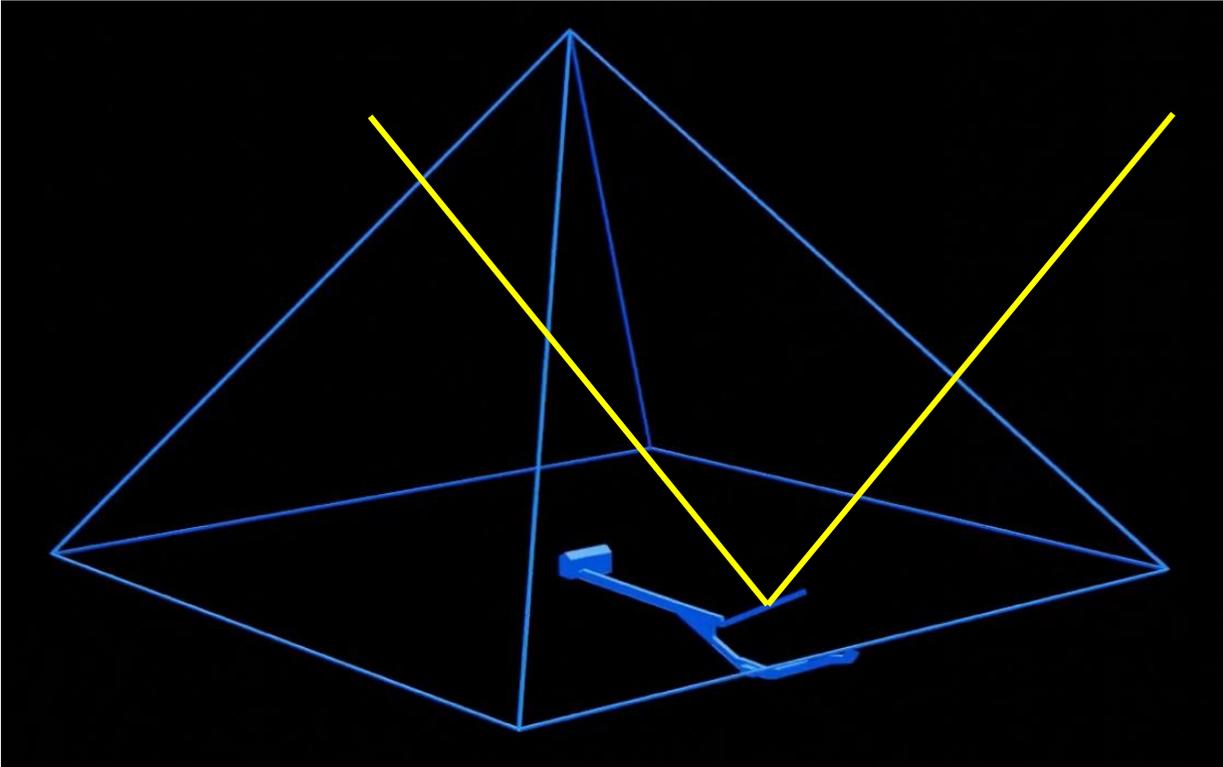
クフ王のピラミッドに  
設置した検出器

# 水平検出器と斜め45度の検出器 により全方位を探查（今後）



クフ王のピラミッドに  
設置した検出器

# Alvarezらが可視化していない領域の観測 下降通路に原子核乾板を設置 2022年10月11日



今後、2～3か月ごとに原子核乾板の交換を行い、継続的に宇宙線イメージングを進める  
\* 次回は少し短めで、11月4日～15日で交換の予定

# 考古学遺跡調査のツールとしての 宇宙線イメージング



イタリア・ナポリ地下遺跡



エジプト  
ピラミッド



古墳



マヤ文明・ホンジュラス  
神殿ピラミッド

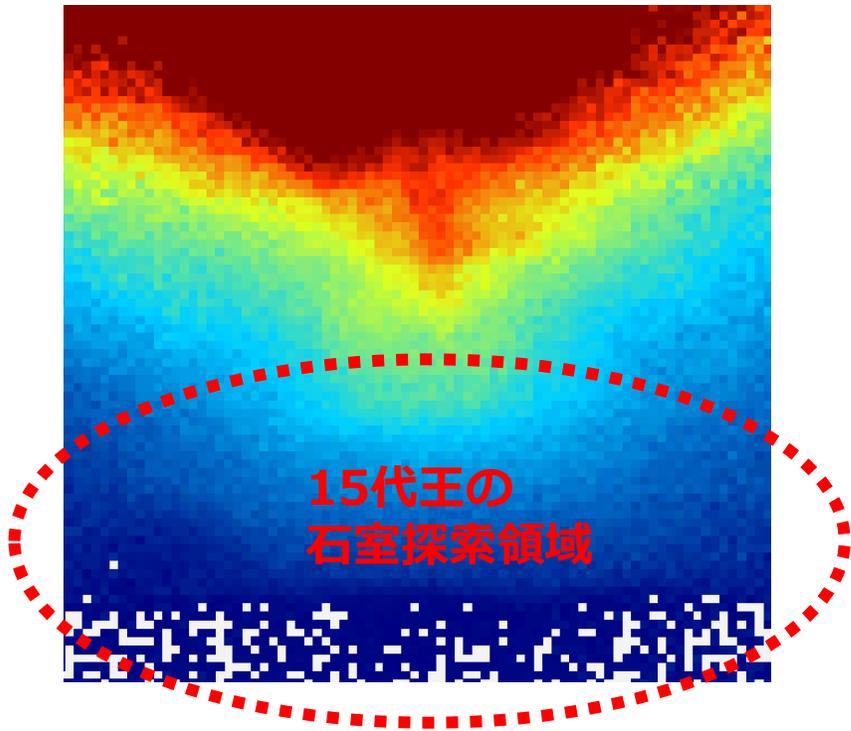
# ホンジュラスのコパン遺跡の調査（2018～）

金沢大学との共同研究

## ・マヤ遺跡に特有な重層建築構造

- ・ 神殿ピラミッド内に複数の石室墓が見つかった
- ・ 発見した場合の発掘へのハードルが低い

## 11号神殿ピラミッド



15代王の墓があると考えられていた領域には、王墓級の空間は検知されなかった  
\* 崩落してる可能性もある

# ティカル遺跡（グアテマラ）

- ・マヤ文明の中でも最重要遺跡の一つ
- ・コパン遺跡と同様に王墓が空洞で見つかっている

**ティカル最大の4号神殿などは未発掘  
王墓発見への期待**



- ・石材は石灰岩：エジプトのピラミッドと同じ
- ・エジプトの大ピラミッドの1/10程度の大きさ



**検出器の設置場所**

- ・地下トンネル
- ・遺跡の周囲

検出器

**良質なデータの取得が期待される  
神殿ピラミッドの3次元可視化**

# 宇宙線イメージングの防災技術への展開

河川堤防の内部イメージング

ボーリング型検出器による地下空洞探査

樹木内部診断



# まとめ

- **宇宙線イメージングの考古学への適用**

- 非破壊イメージングによる未知構造の検知
- 遺跡に優しい最小限・効率的な発掘を可能にする
- 文化遺産保護にも貢献

- **ScanPyramids**

- クフ王のピラミッドでは、宇宙線イメージングにより発見された空間の発掘に向けた複合調査が進んでいる
- カフラー王のピラミッドの調査を開始

- **その他、マヤ遺跡やナポリの地下遺跡、古墳などへも適用開始・検討中**

- **さらに別の領域では、防災技術などへも技術を展開**