

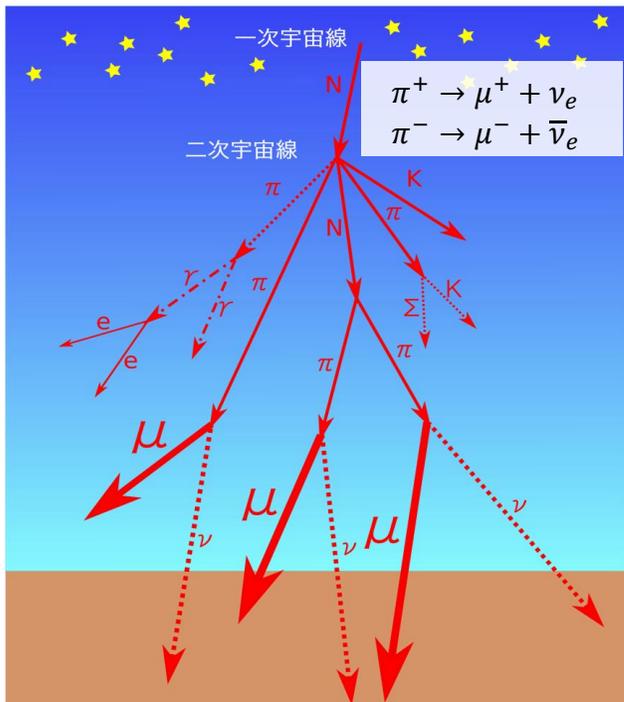
宇宙線イメージング考古学

森島 邦博
名古屋大学



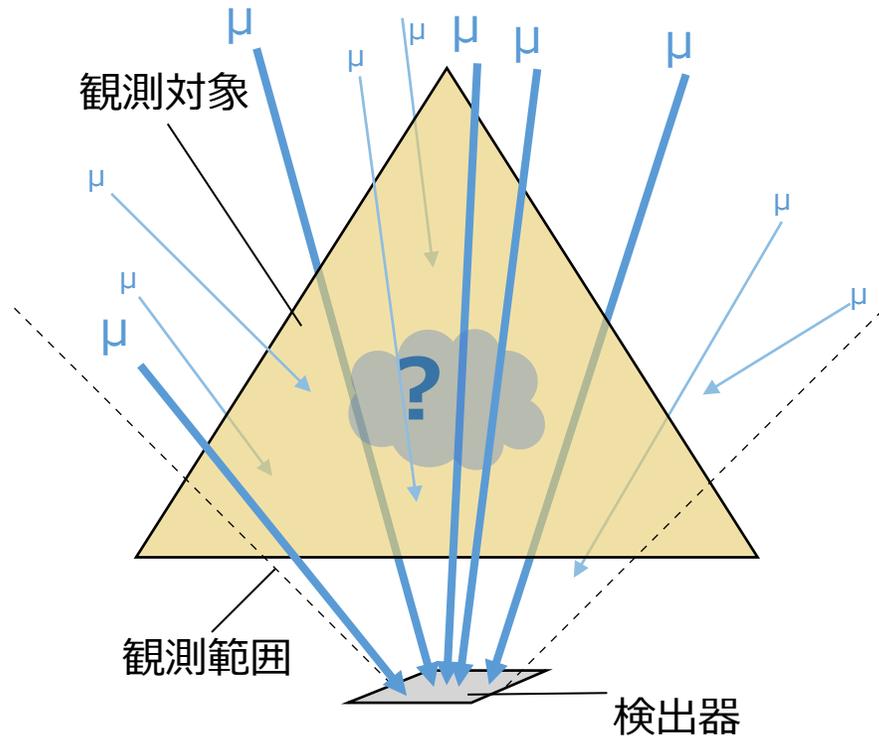
宇宙線ミュオンイメージング

宇宙線



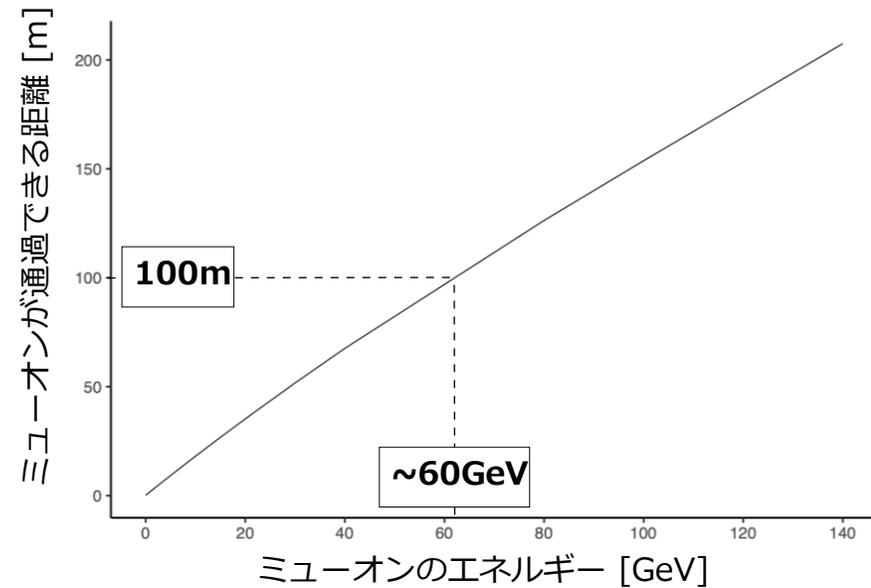
幅広いエネルギーの宇宙線
ミュオンがあらゆる方向から
飛来

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^3 の岩盤中の ミュオンの飛程



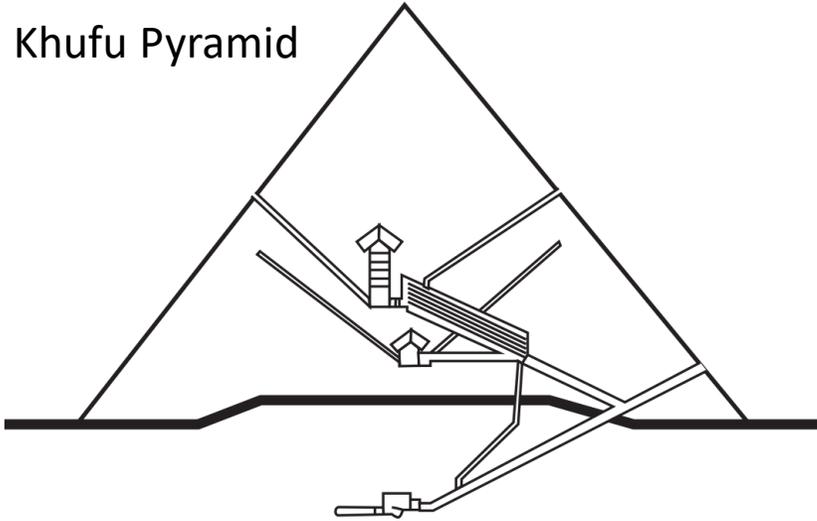
Groom, D. E. et al. (2001)

1TeVを超えるミュオンは1kmの
岩盤を貫通

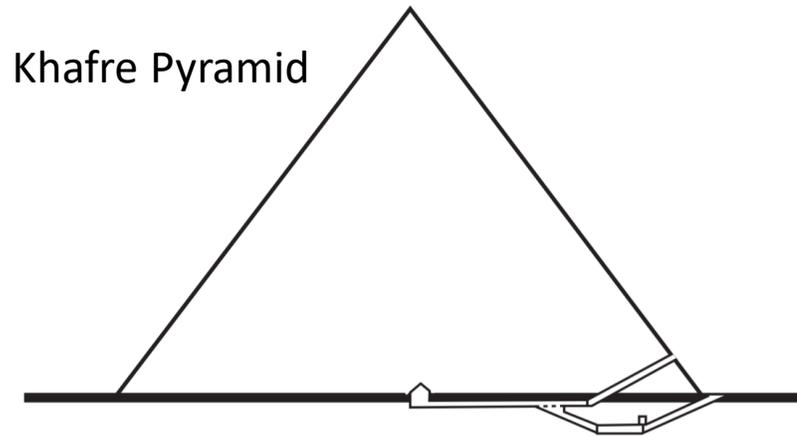
ギザの三大ピラミッド

ピラミッドの内部構造の謎

Khufu Pyramid

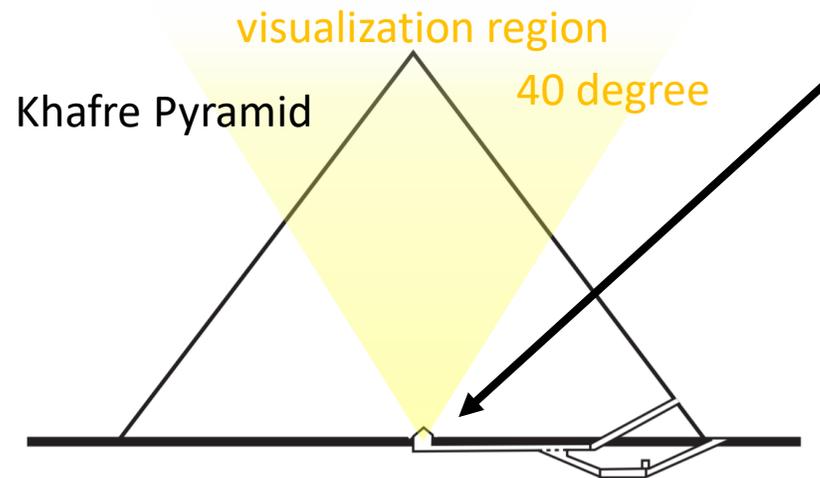
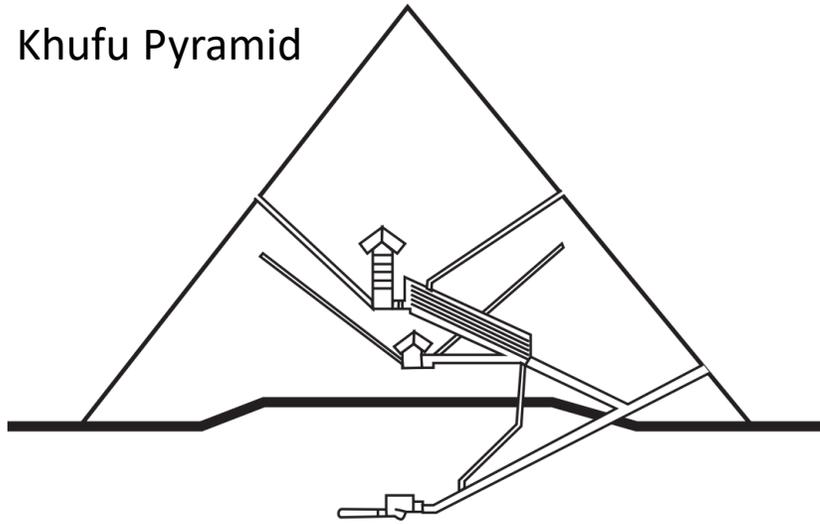


Khafre Pyramid

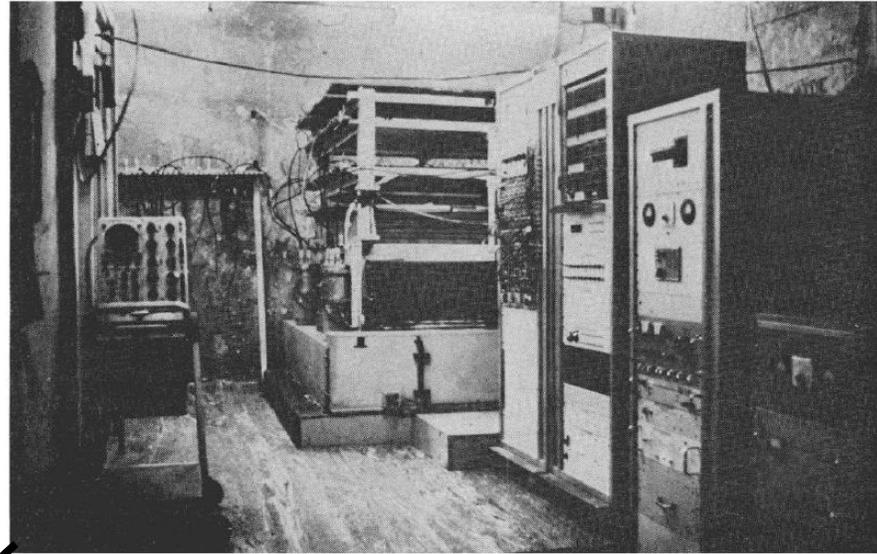


The first cosmic-ray imaging of Khafre Pyramid by Alvarez et al. (1970)

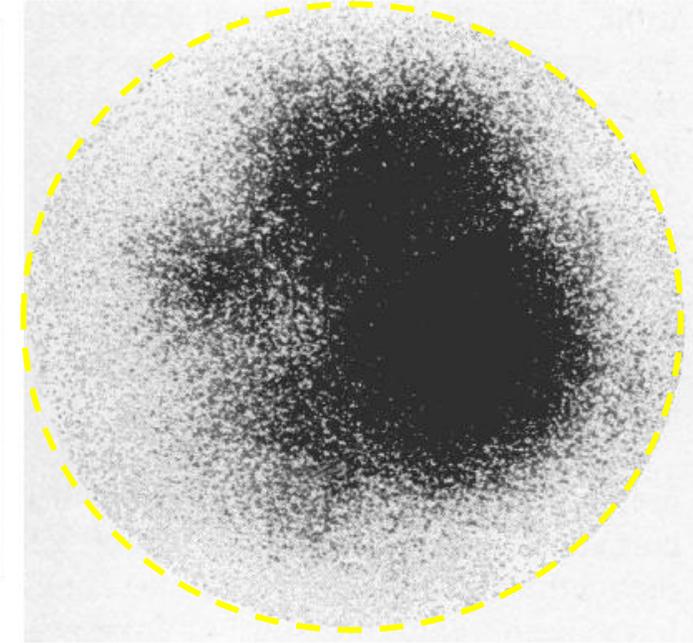
L. W. Alvarez, Science, 167, 3919, 832-839



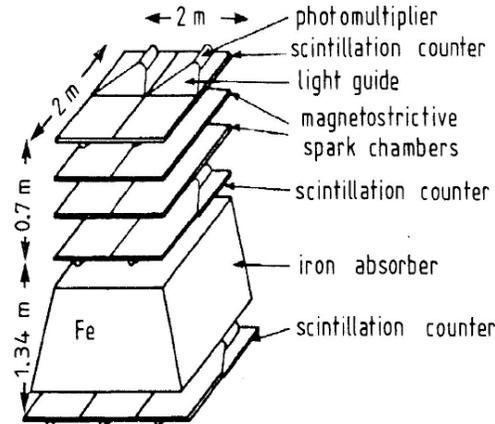
Belzoni Chamber に設置されたスパークチェンバー



初めてのミュオンイメージング



検出器面積 : 4m²
観測期間 : 数カ月



カフラー王のピラミッド内部に未知の内部構造は検出されなかった

ScanPyramids (2015-)

The mission of this project is to reveal the mysteries of the pyramids by using state-of-the-art technologies

Organization

Egyptian Ministry of Antiquities, Cairo University and HIP institute

Target Pyramids

Khufu, Khafre, Menkahfre @Giza
Red, Bent @Dahashr

Participating countries

Egypt (Cairo University)

Japan (Nagoya University, KEK : Cosmic Ray Imaging)

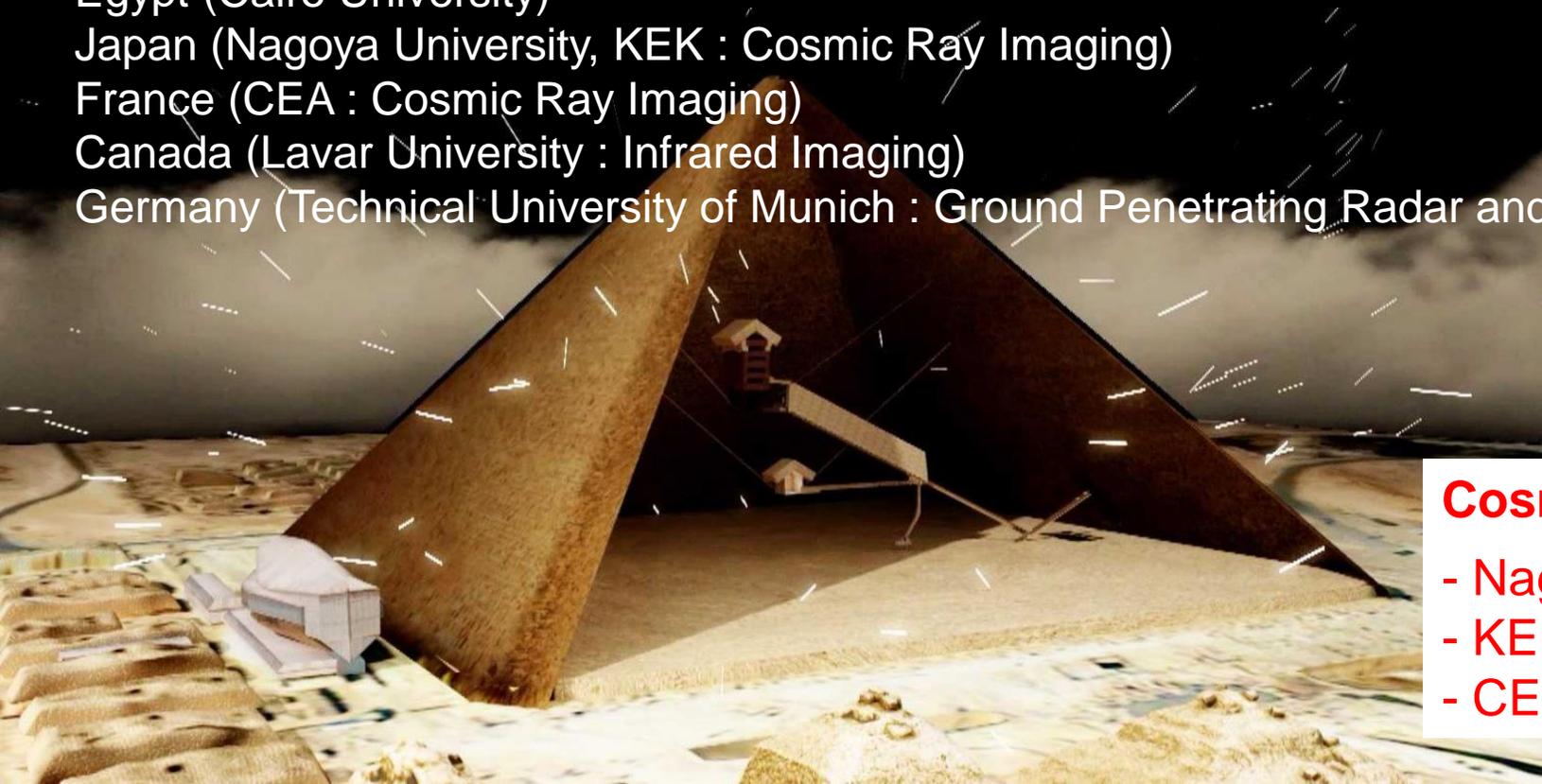
France (CEA : Cosmic Ray Imaging)

Canada (Lavar University : Infrared Imaging)

Germany (Technical University of Munich : Ground Penetrating Radar and Ultra Sonic Survey)

Cosmic Ray Imaging

- Nagoya University (Nuclear Emulsion)
- KEK (Plastic Scintillator)
- CEA (Gas Detector)



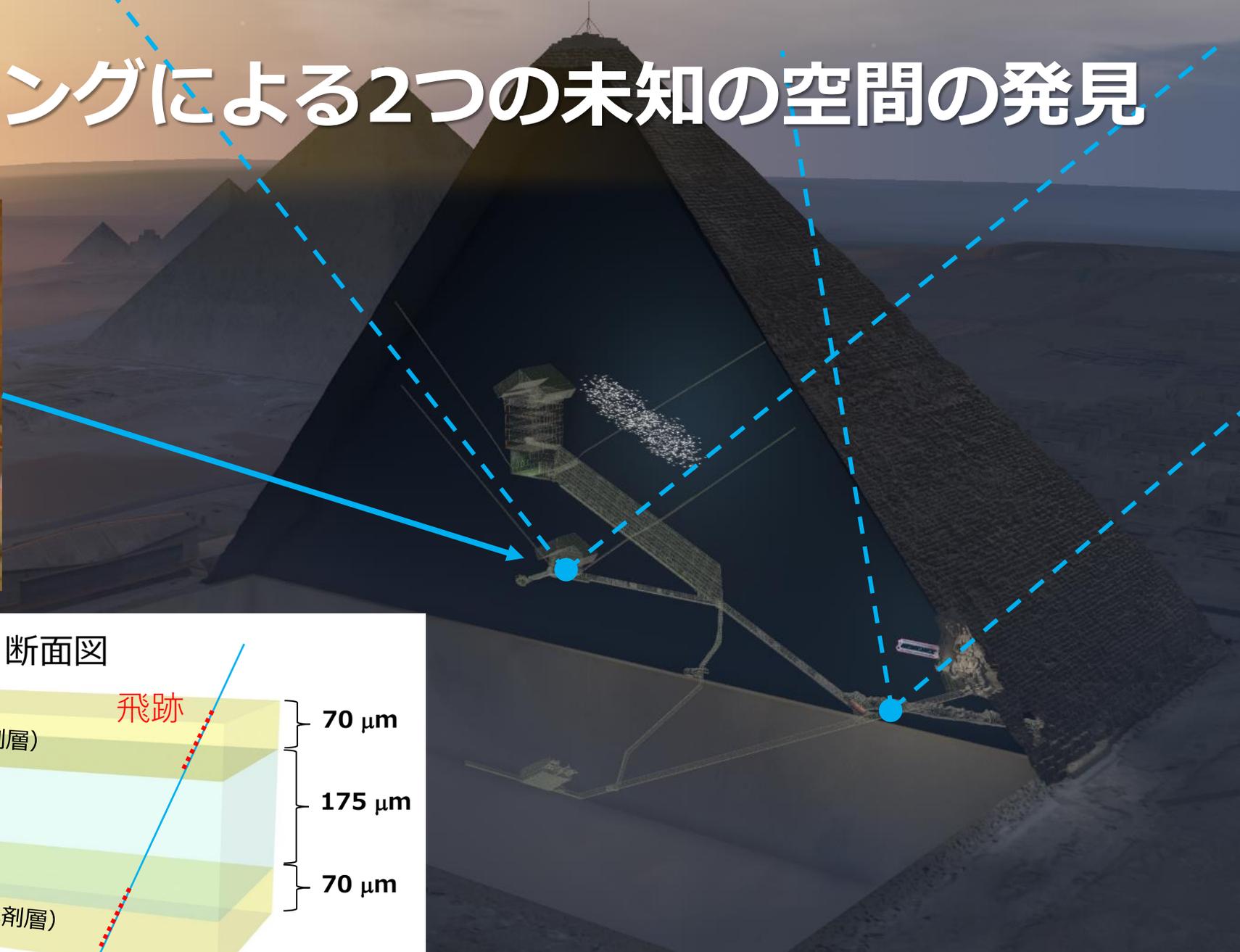
Interdisciplinary research project

ScanPyramids is a multidisciplinary project by scientists, engineers, artists, and media.

- Scientists (Physics, Engineering, Robotics...)
- Engineers (GC, VR, AR)
- Artists
- Media

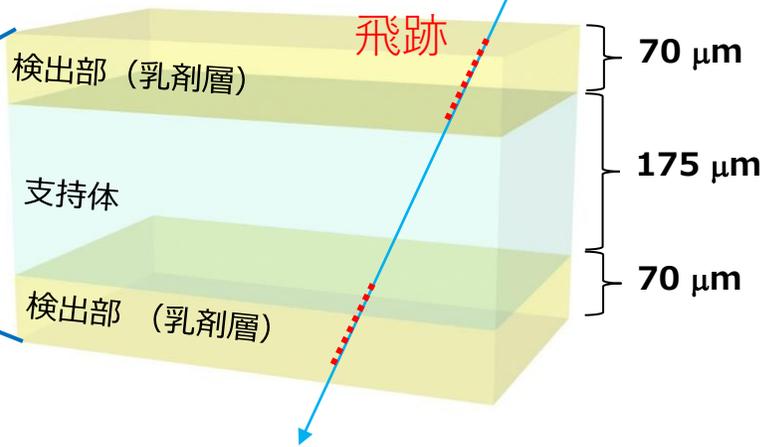
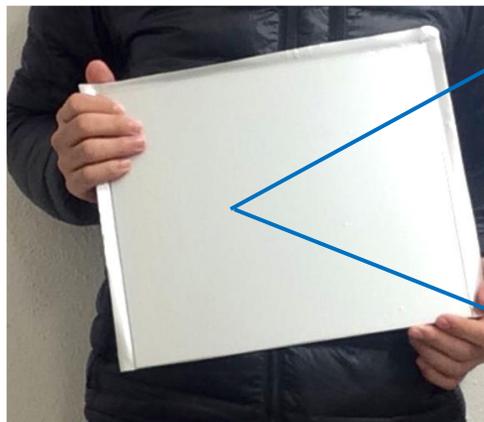


宇宙線イメージングによる2つの未知の空間の発見



原子核乾板

断面図

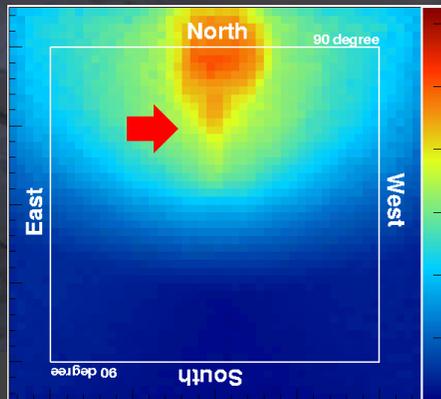
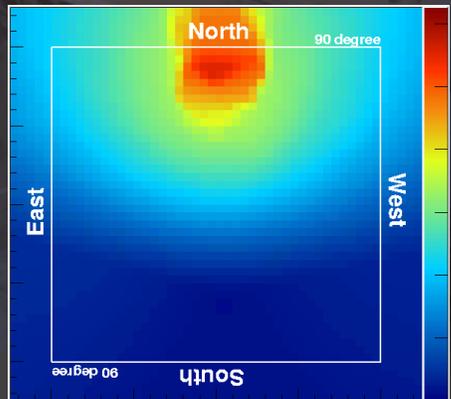
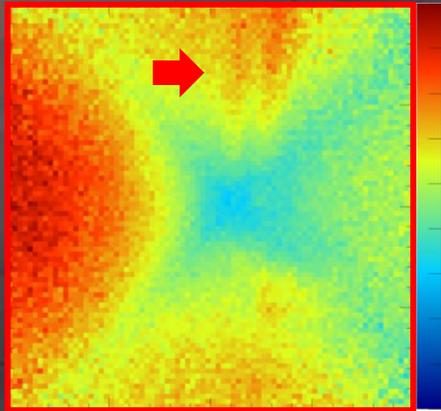
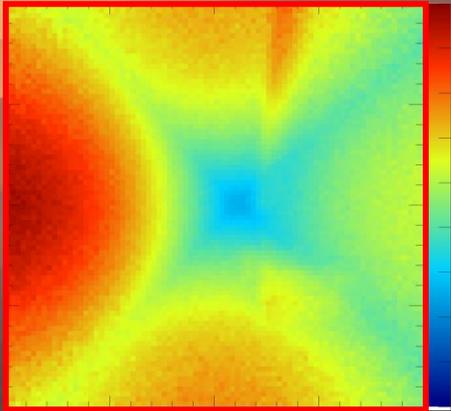


宇宙線イメージングによる2つの未知の空間の発見

シミュレーションと観測データの間
に有意な差を検出

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

巨大空間
(2017年)

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

通路状の空間
(2016年)

2か所

シェブロン

1か所

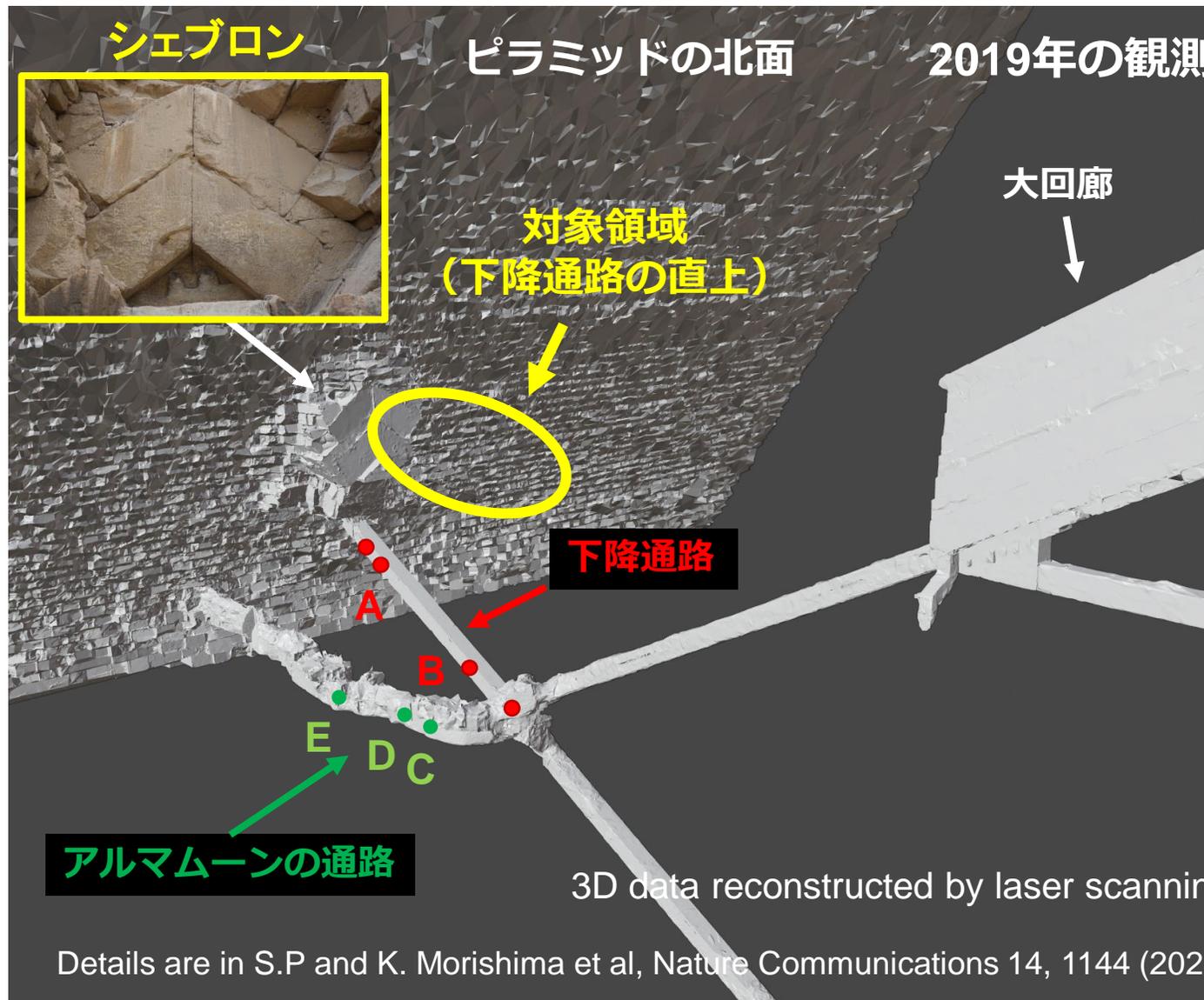


シェブロン背後の多地点宇宙線イメージング

下降通路



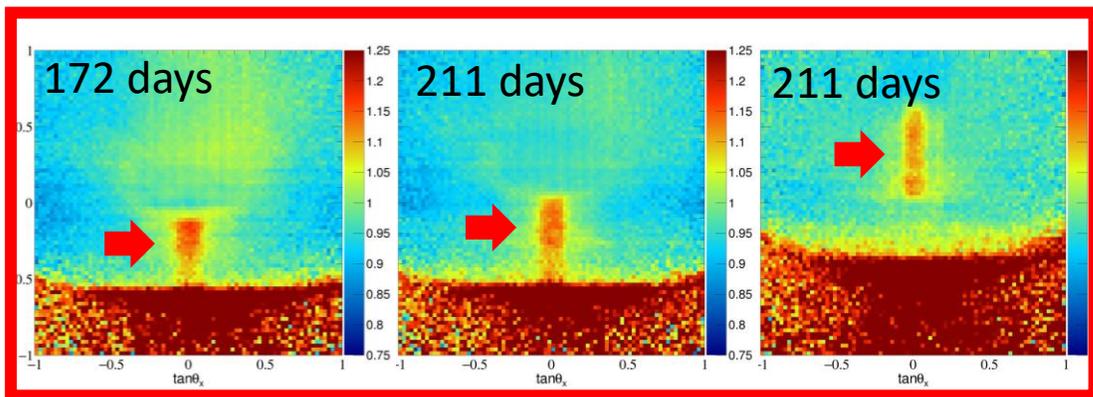
アルマムーンの通路



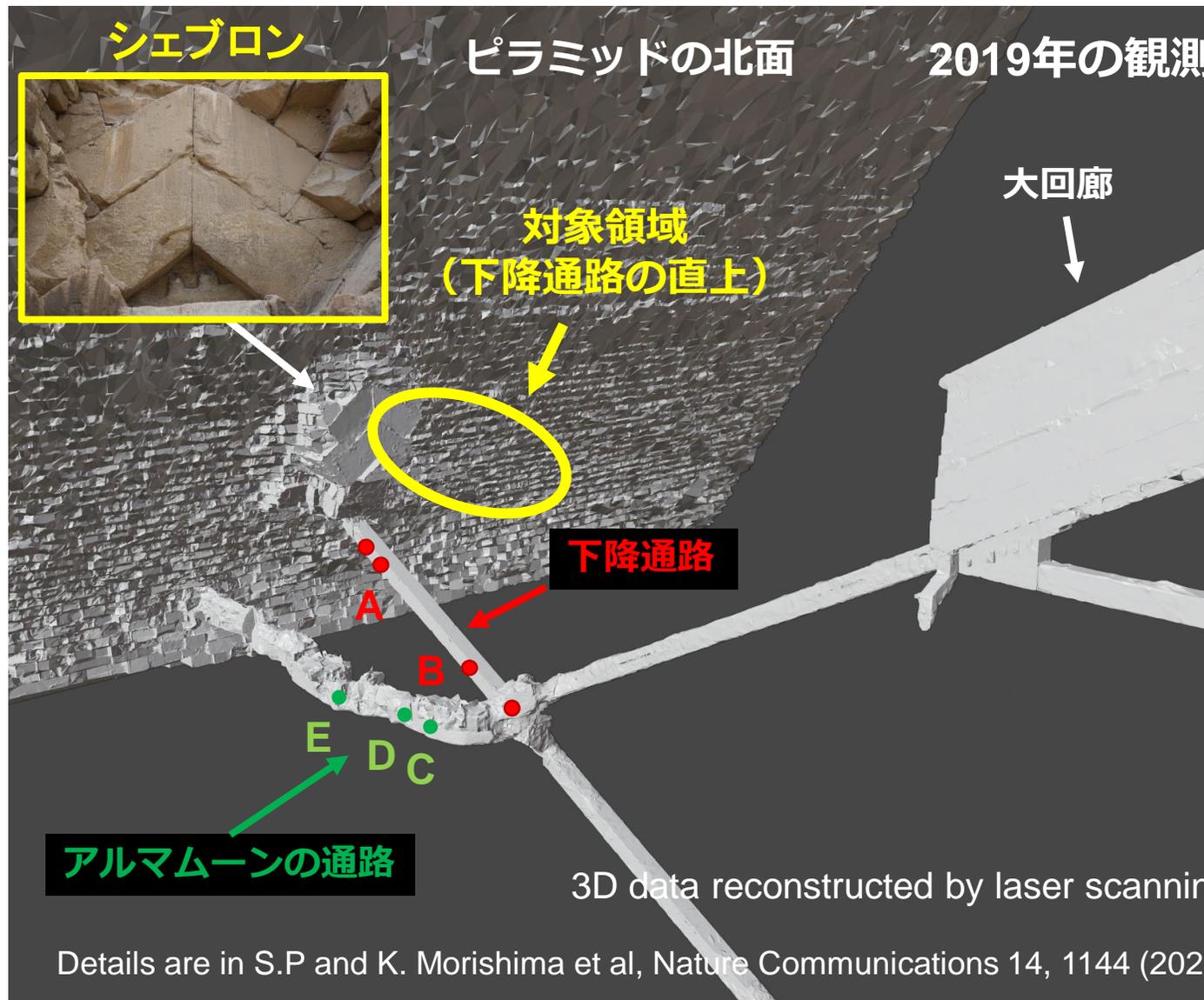
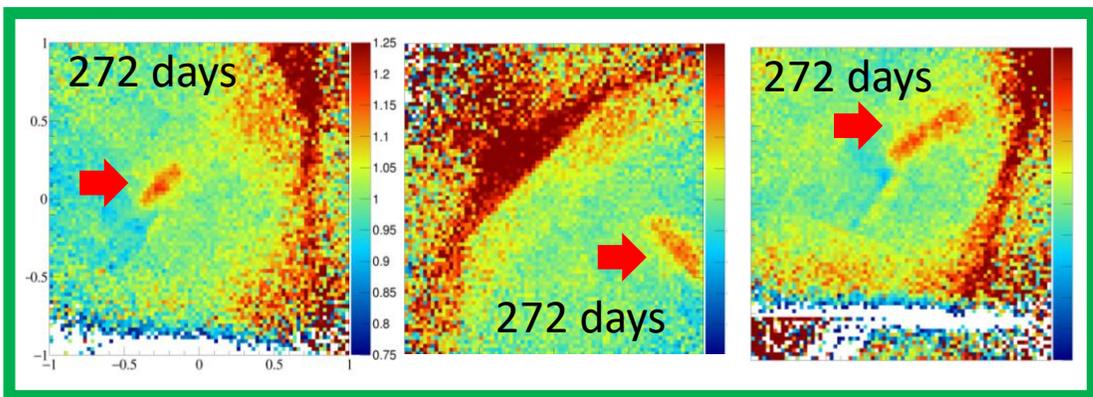
Details are in S.P and K. Morishima et al, Nature Communications 14, 1144 (2023)

シェブロン背後の多地点宇宙線イメージング

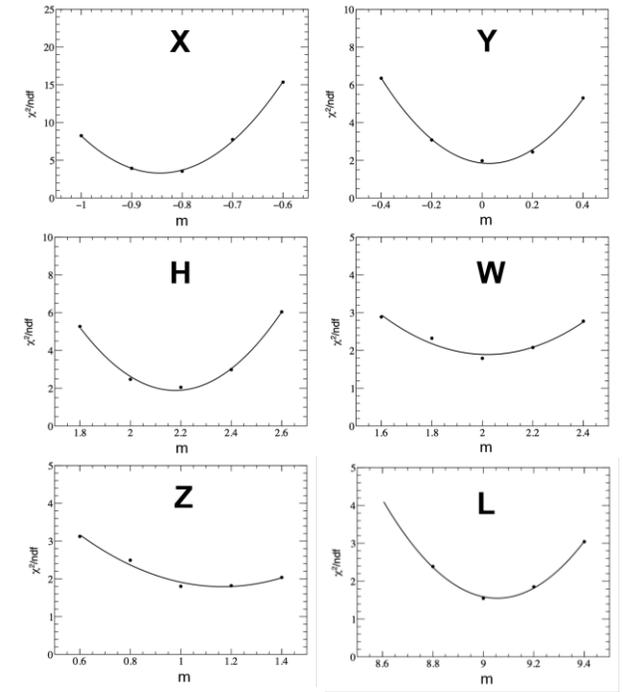
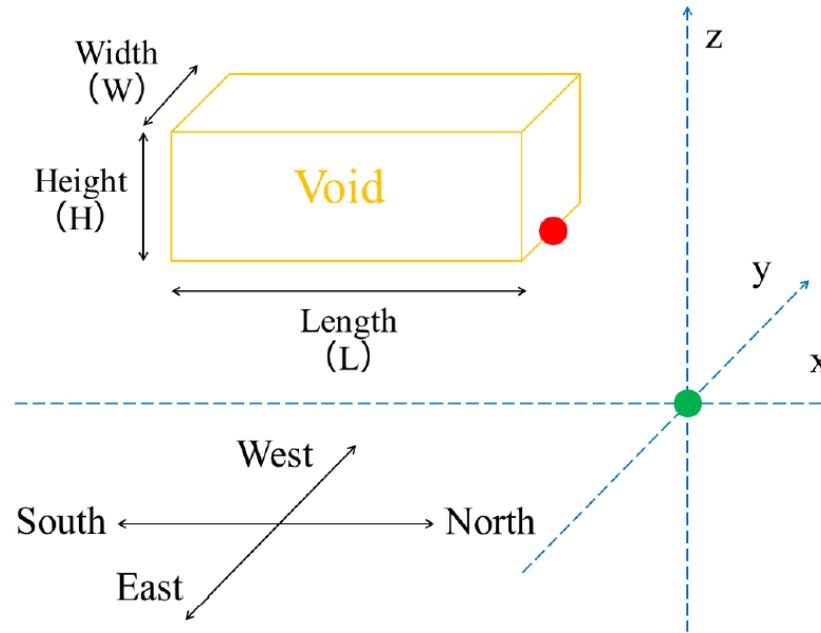
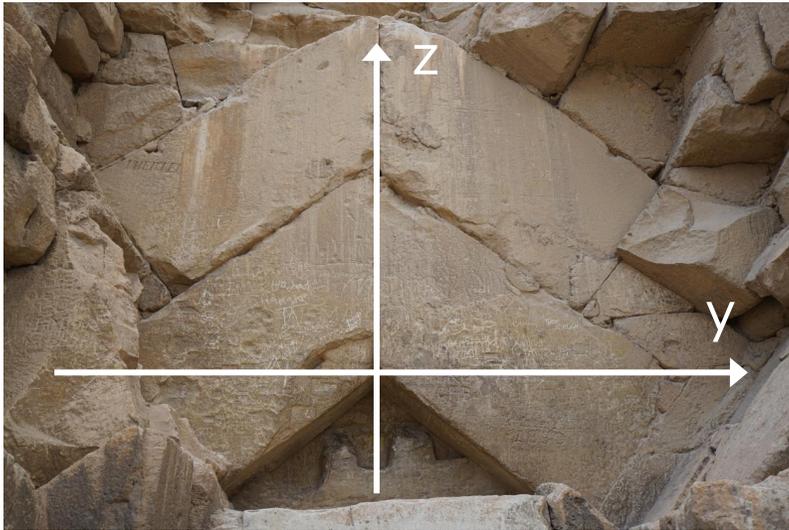
下降通路



アルマムーンの通路



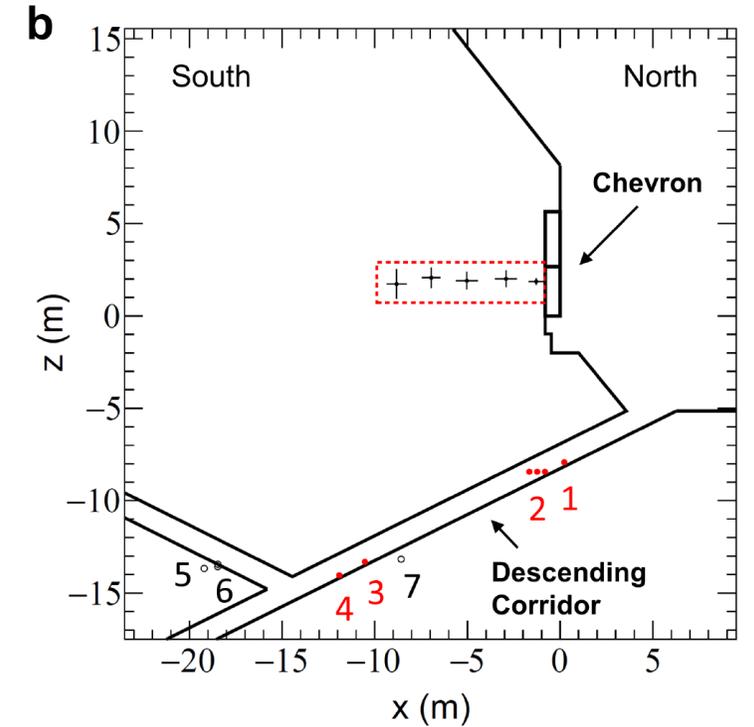
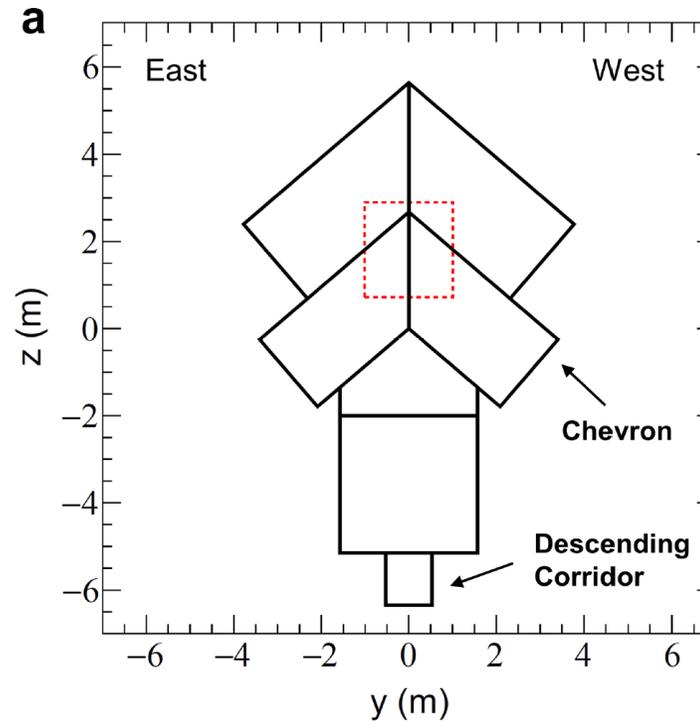
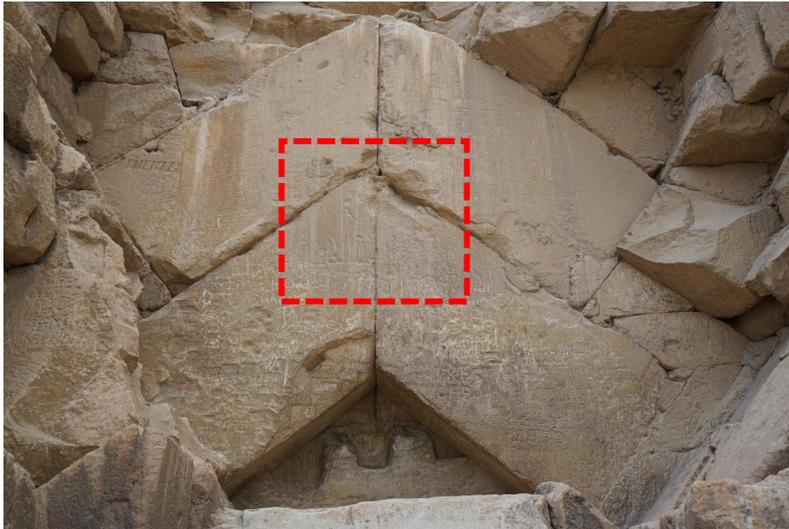
新空間の形状解析の結果



Parameter	Nagoya estimate
width W (m)	2.02 ± 0.06
height H (m)	2.18 ± 0.17
length L (m)	9.06 ± 0.07
North-South X (m)	0.84 ± 0.05
East-West Y (m)	0.03 ± 0.04
altitude Z (m)	0.72 ± 0.13
slope α ($^\circ$)	-0.3 ± 1.5

- 空間の形状を直方体と仮定したシミュレーションとデータを比較
- 形状（高さ、幅、長さ）と位置（ X, Y, Z ）の6パラメータについて χ^2 値が最小となる値で評価

新空間の形状解析の結果



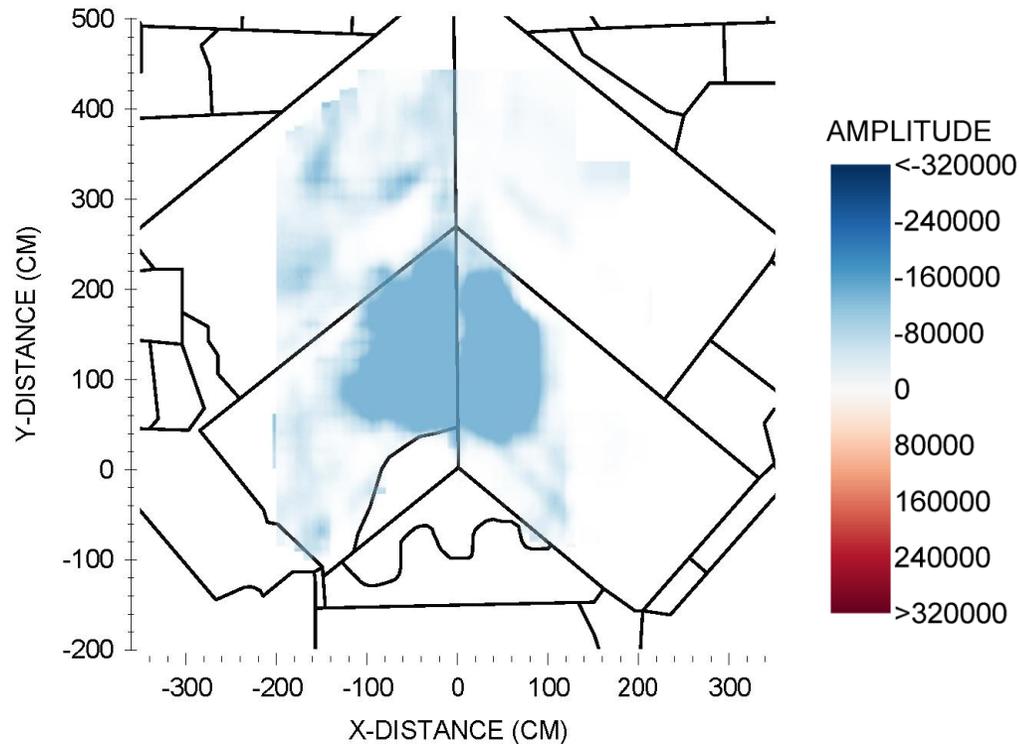
新空間の推定結果

形状 : 2.02m (width) x 2.18m (height) x 9.06m (length)

位置 : シェブロンの表面から80cm奥から始まる (板の厚さと一致!)

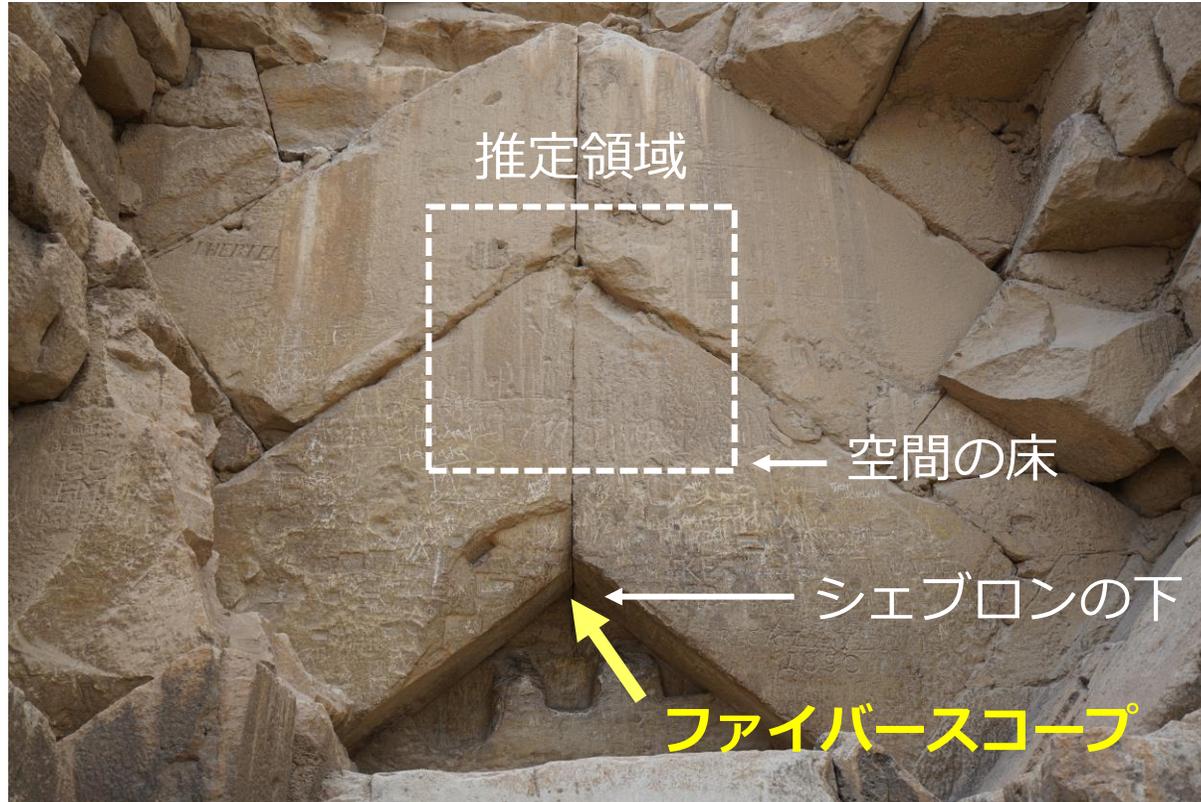
地中レーダーによる確認

GPR: 400 MHz – GSSI 50400S – Time Slice



- 宇宙線イメージングで特定した新空間の存在領域を地中レーダー探査により確認
(ミュンヘン工科大学とカイロ大学により実施された)
- 宇宙線イメージングの結果を支持する結果

ファイバースコープによる直接確認



シェブロンとその背後の石組みの隙間を利用してファイバースコープを挿入



ScanPyramids North Face Corridor



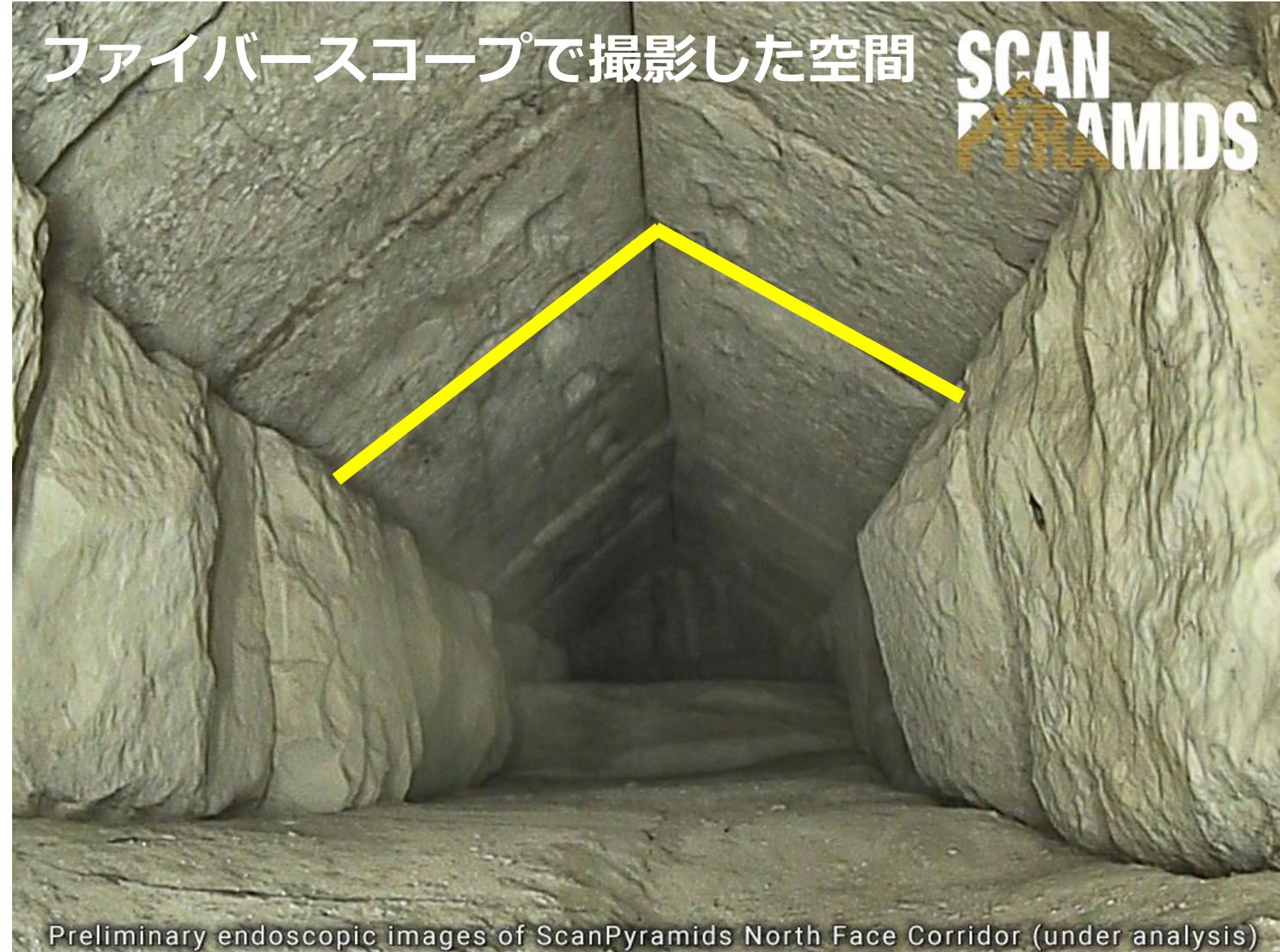
- 実際の形状は切妻構造（屋根型）
- レーザースキャンなどによる詳細な形状の測定が今後の課題
- 宇宙線イメージングで発見した空間の存在を確認した初めての事例
- 考古遺跡調査における重要な成果



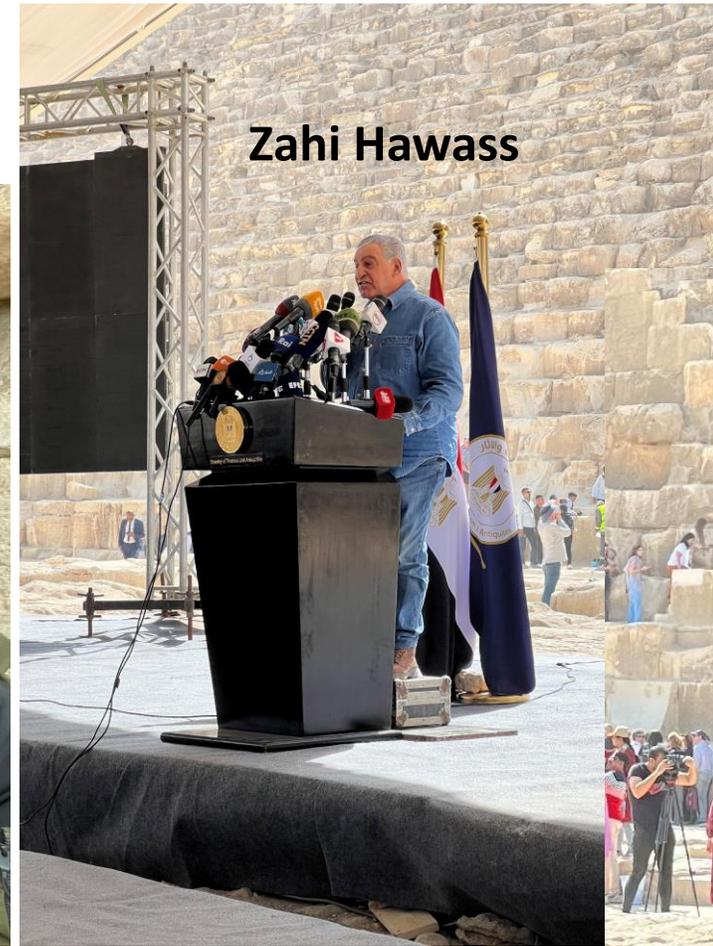
ScanPyramids North Face Corridor



- 実際の形状は切妻構造（屋根型）
- レーザースキャンなどによる詳細な形状の測定が今後の課題
- 宇宙線イメージングで発見した空間の存在を確認した初めての事例
- 考古遺跡調査における重要な成果



考古学との学際研究

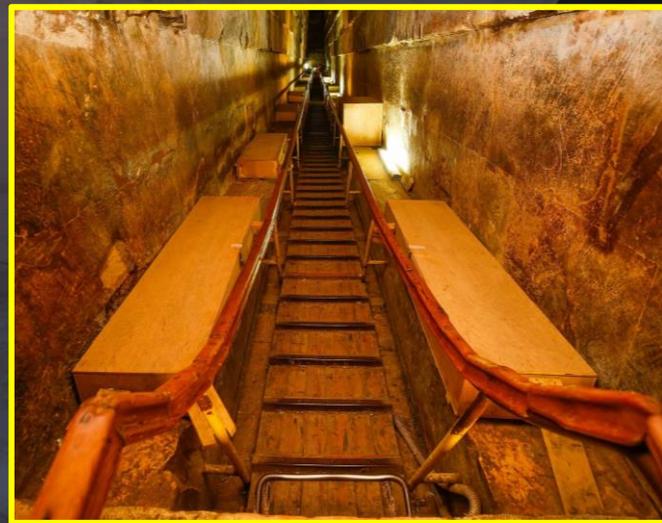


- エジプト考古学者らと共にファイバースコープの映像を確認
- 2023年3月2日（確認の数日後）に、急遽、ピラミッドの前で国際記者会見の開催が決定
- 前エジプト考古大臣のザヒ・ハワスは、「今世紀最大の発見」と発言
- 宇宙線を用いた学際研究の1つの成功例

大回廊と地下の間からの観測

大回廊からの巨大空間の観測

- ・ 多地点宇宙線イメージングを実施
- ・ 位置と形状の詳細な推定を目指す



ScanPyramids big Boid
(SP-BV)

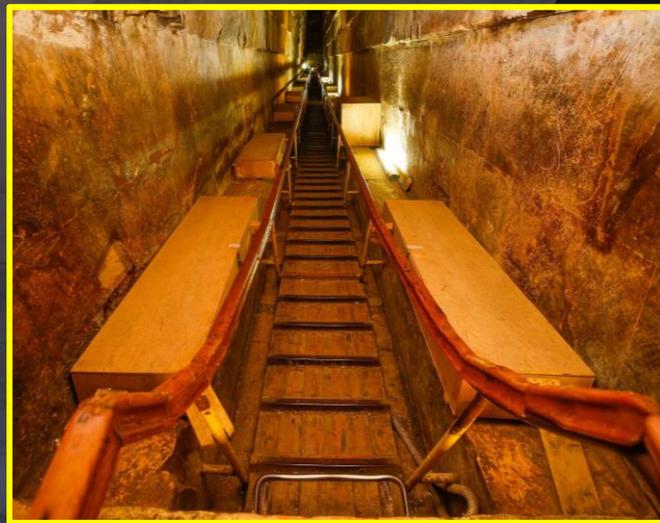
ScanPyramids North
Face Corridor (SP-NFC)



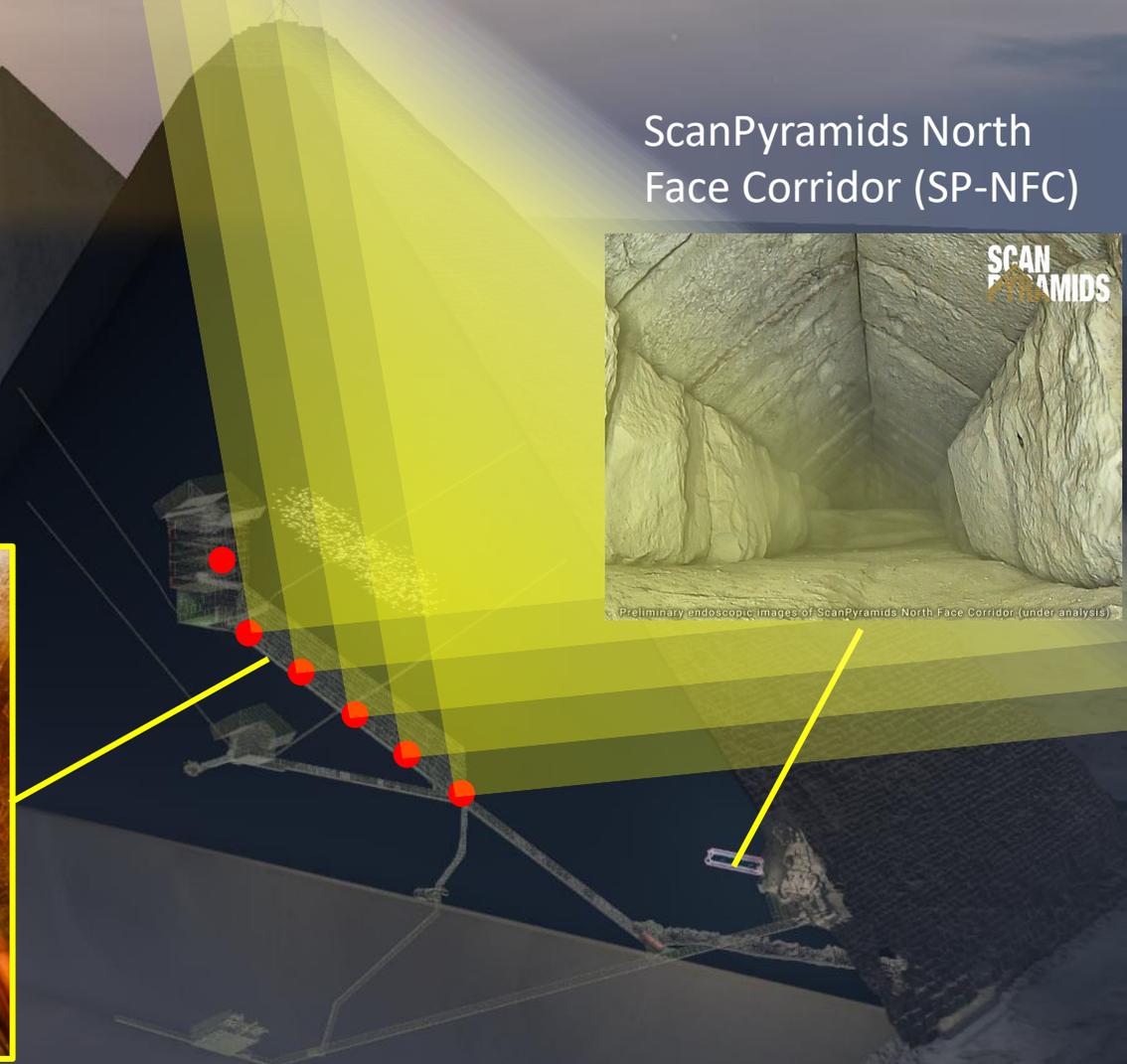
大回廊と地下の間からの観測

大回廊からの巨大空間の観測

- ・ 多地点宇宙線イメージングを実施
- ・ 位置と形状の詳細な推定を目指す



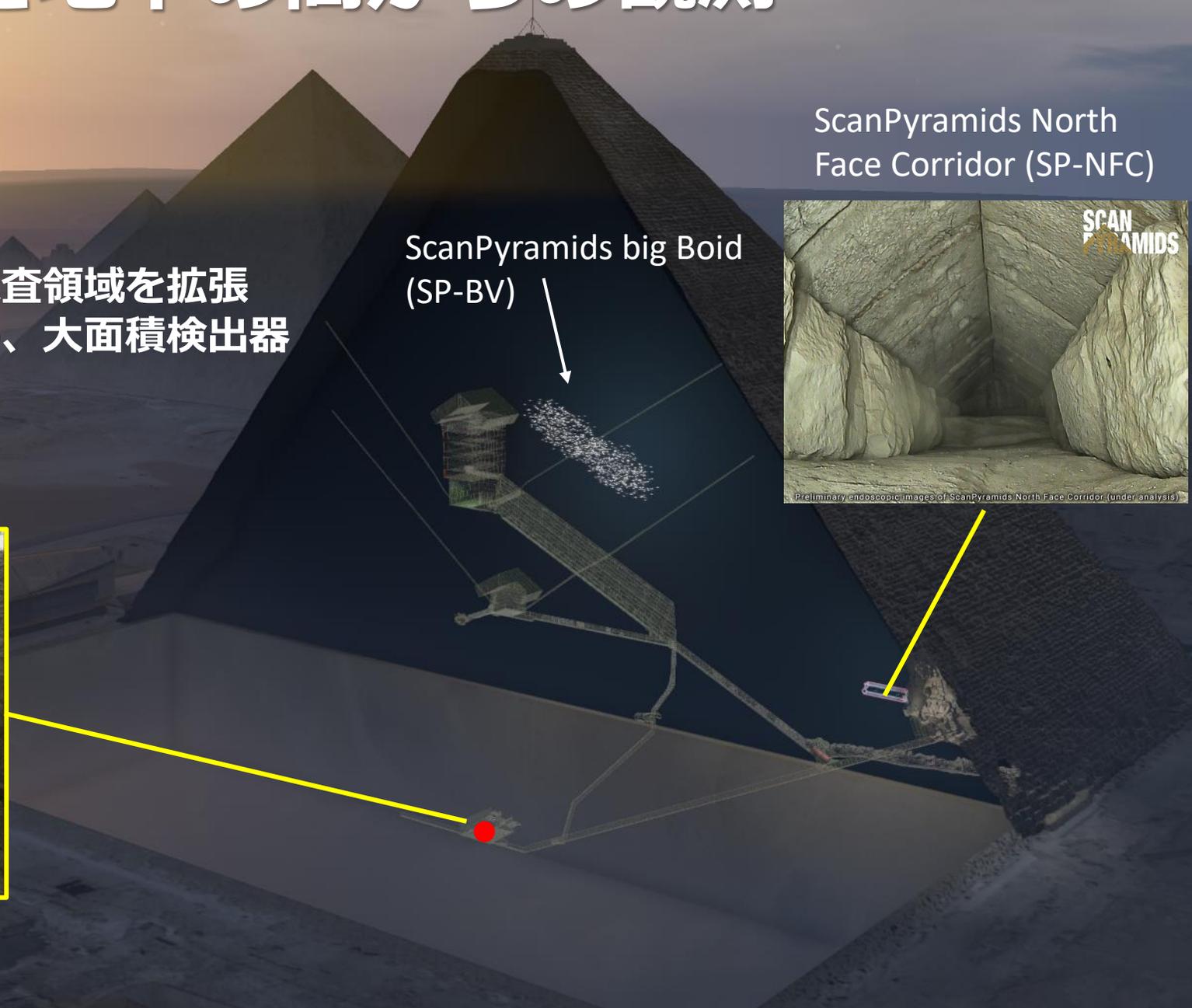
ScanPyramids North Face Corridor (SP-NFC)



大回廊と地下の間からの観測

地下の間からの観測

- ・ 女王の間の周辺・下部まで探査領域を拡張
- ・ ピラミッド最深部であるため、大面積検出器を設置 (4.5m² x 2)



ScanPyramids North Face Corridor (SP-NFC)



大回廊と地下の間からの観測

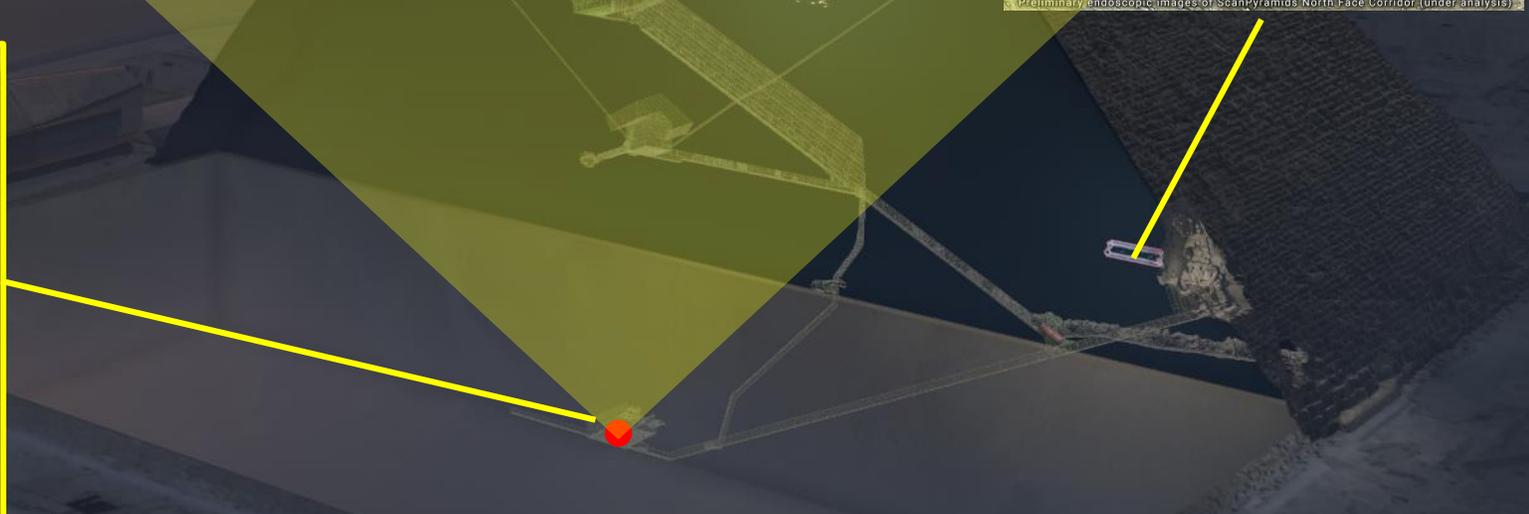
地下の間からの観測

- ・ 女王の間の周辺・下部まで探査領域を拡張
- ・ ピラミッド最深部であるため、大面積検出器を設置 (4.5m² x 2)



ScanPyramids big Boid (SP-BV)

ScanPyramids North Face Corridor (SP-NFC)



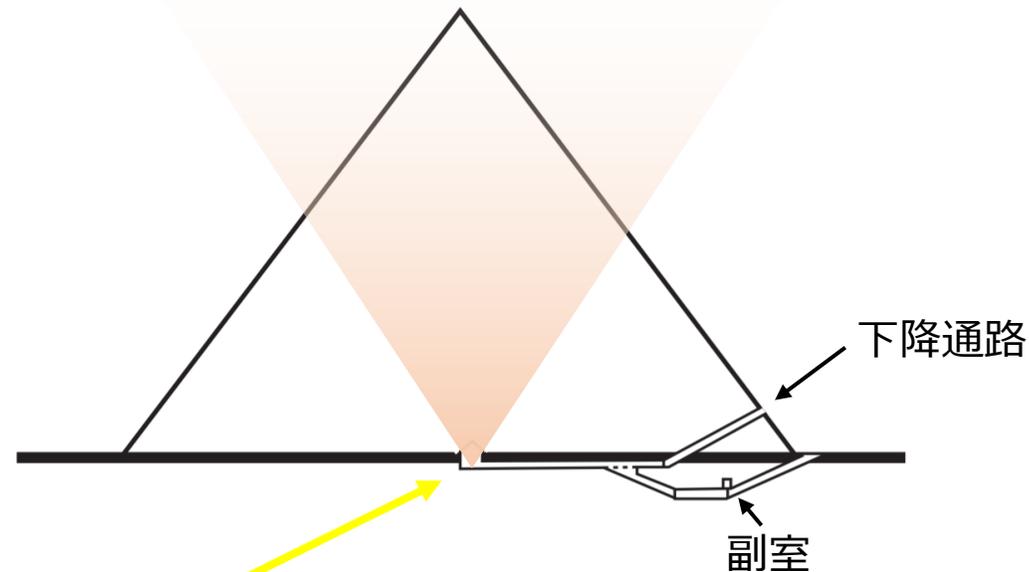
カフラー王のピラミッド (2022年10月～)



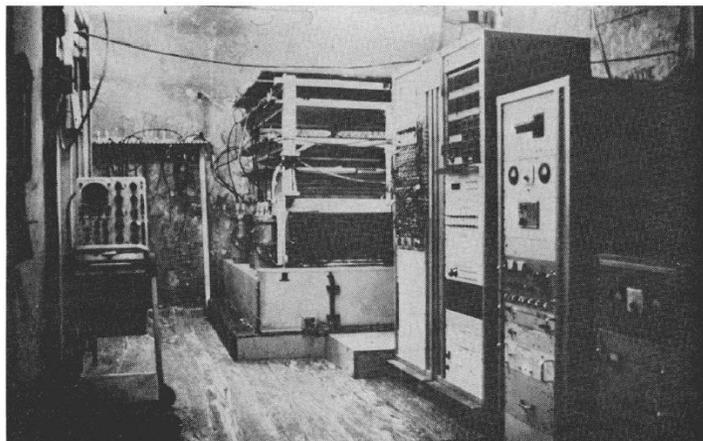
カフラー王のピラミッド

- ・ 原子核乾板を多地点かつ多方向に設置することで、**アルヴァレらが測定していない領域まで探査**
- ・ 初の**全方位可視化**
- ・ アルヴァレらが設置した位置に原子核乾板を設置することで、**結果の直接検証**

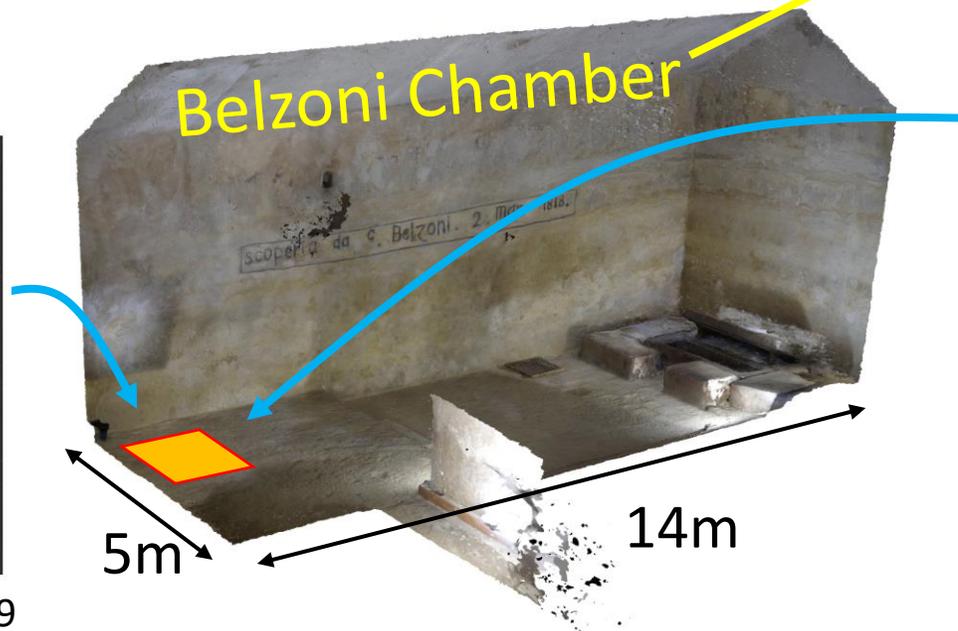
Alvarez. et.al,



アルヴァレらのスパークチェンバー

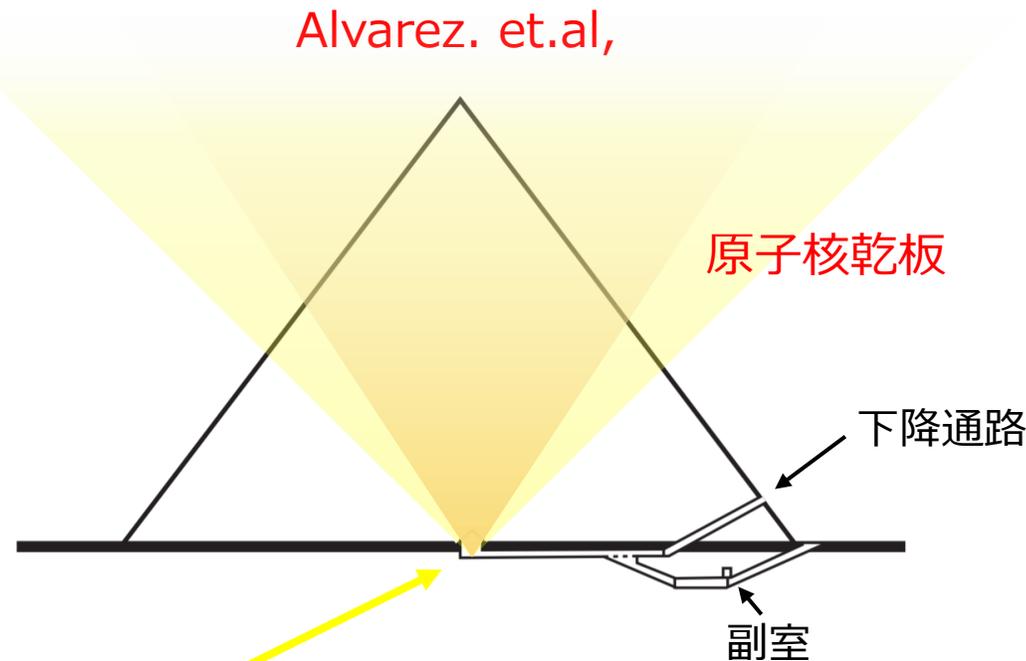


L. W. Alvarez, Science, 167, 3919, 832-839

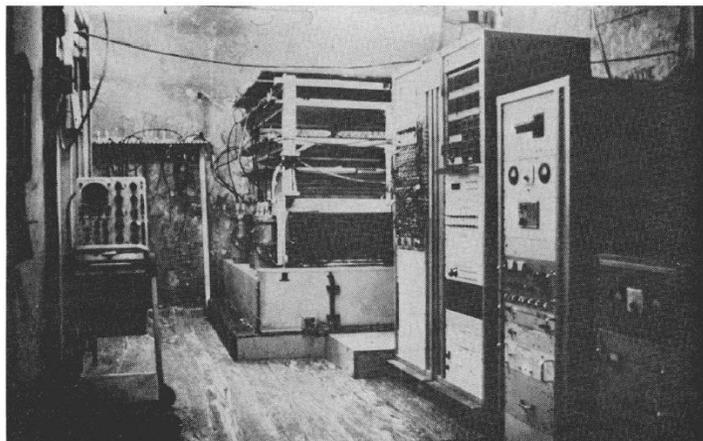


カフラー王のピラミッド

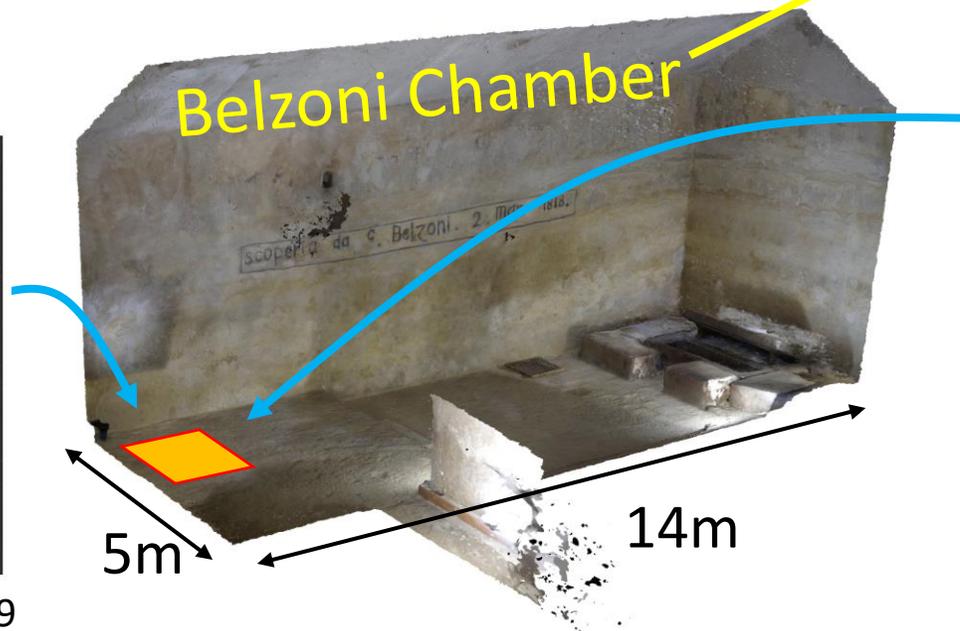
- ・ 原子核乾板を多地点かつ多方向に設置することで、**アルヴァレらが測定していない領域まで探査**
- ・ 初の**全方位可視化**
- ・ アルヴァレらが設置した位置に原子核乾板を設置することで、**結果の直接検証**



アルヴァレらのスパークチェンバー

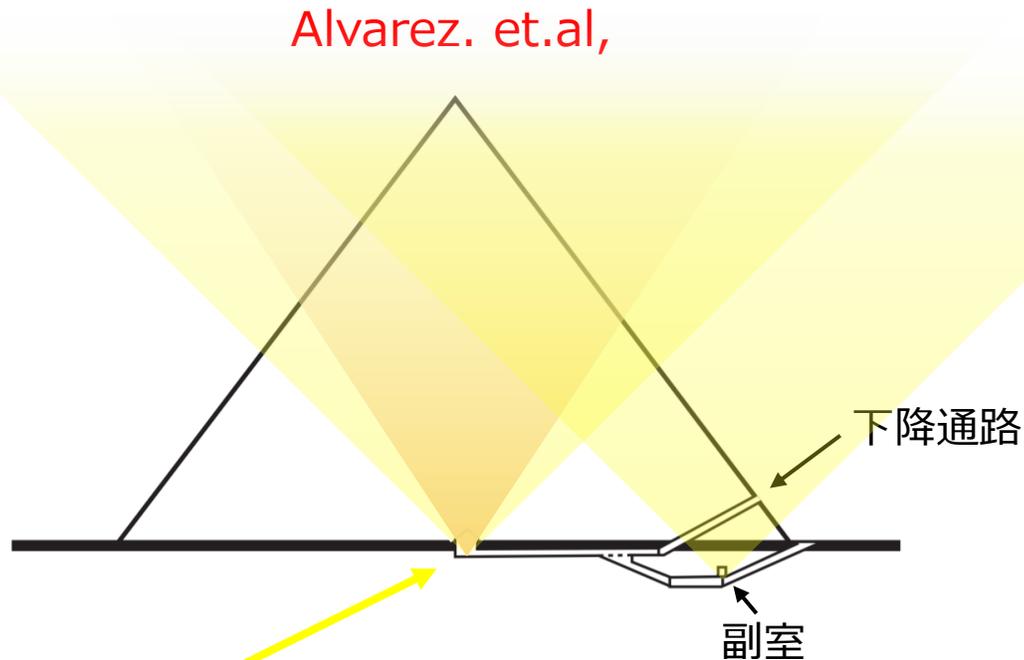


L. W. Alvarez, Science, 167, 3919, 832-839

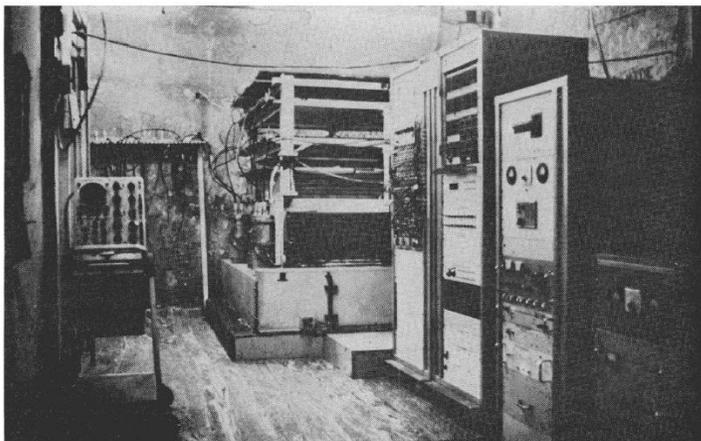


カフラー王のピラミッド

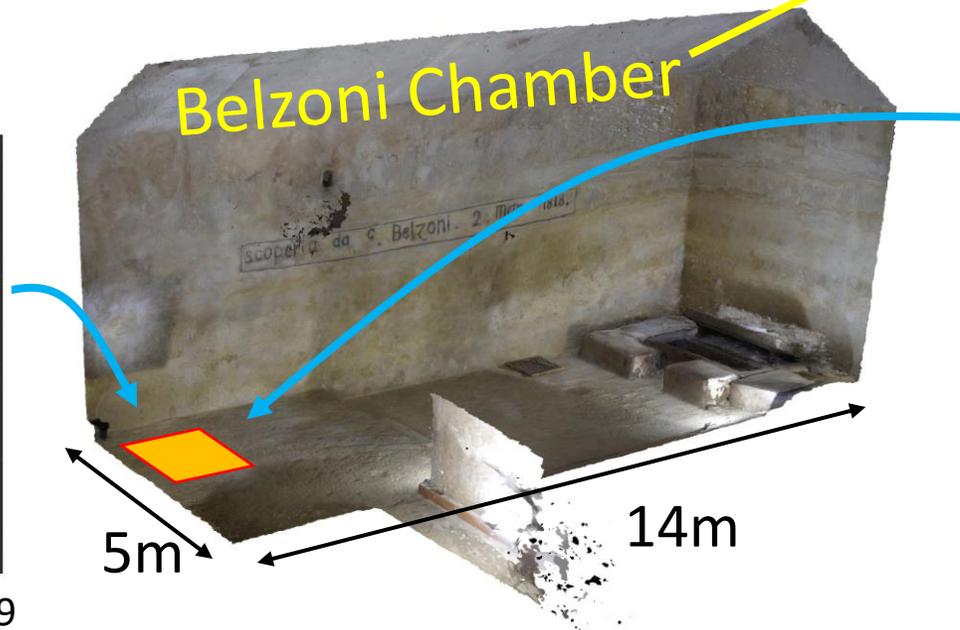
- ・ 原子核乾板を多地点かつ多方向に設置することで、**アルヴァレらが測定していない領域まで探査**
- ・ 初の**全方位可視化**
- ・ アルヴァレらが設置した位置に原子核乾板を設置することで、**結果の直接検証**



アルヴァレらのスパークチェンバー



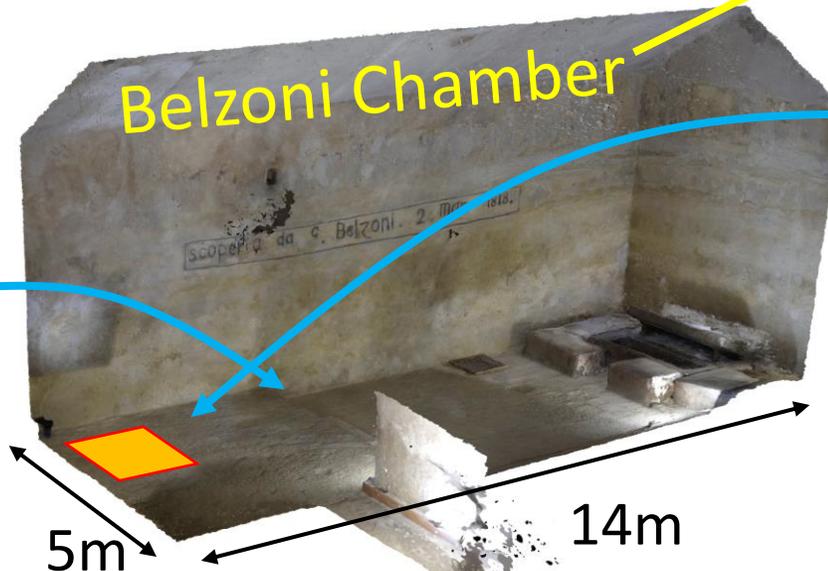
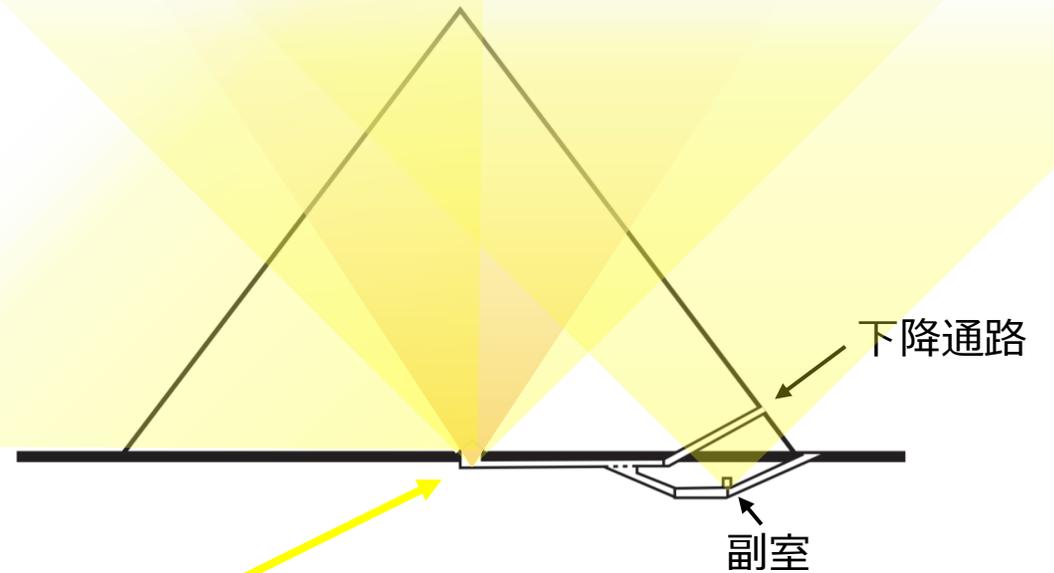
L. W. Alvarez, Science, 167, 3919, 832-839



カフラー王のピラミッド

- ・ 原子核乾板を多地点かつ多方向に設置することで、**アルヴァレらが測定していない領域まで探査**
- ・ 初の**全方位可視化**
- ・ アルヴァレらが設置した位置に原子核乾板を設置することで、**結果の直接検証**

Alvarez. et.al,



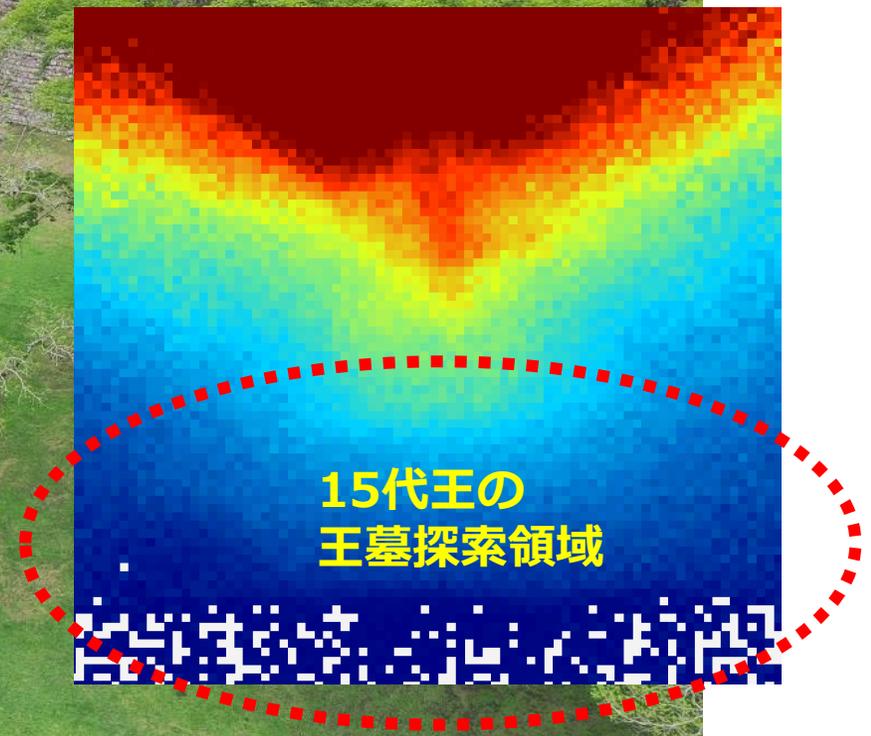
マヤ文明のコパン遺跡@ホンジュラス

金沢大学、ホンジュラスの歴史人類学研究所の考古学者との共同研究

11号神殿



原子核乾板



イタリア・ナポリ市街地の地下遺跡探査

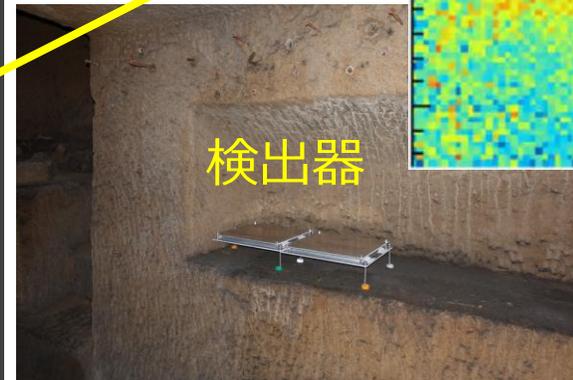
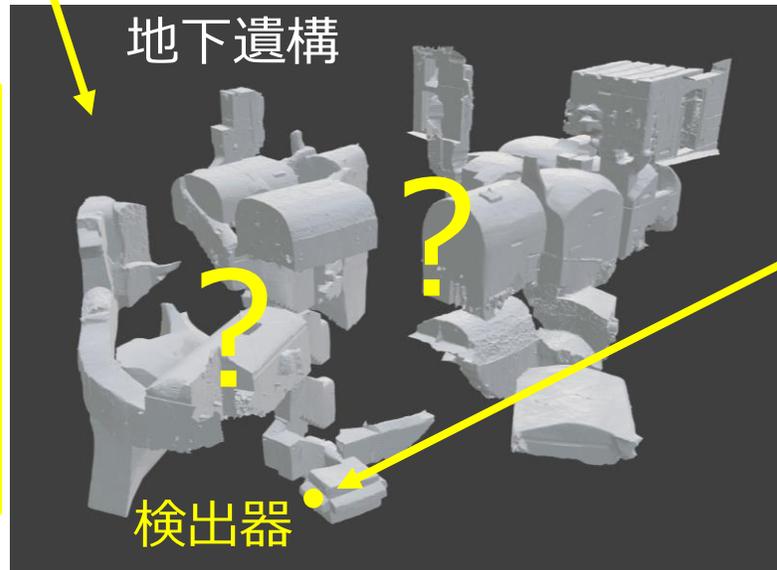
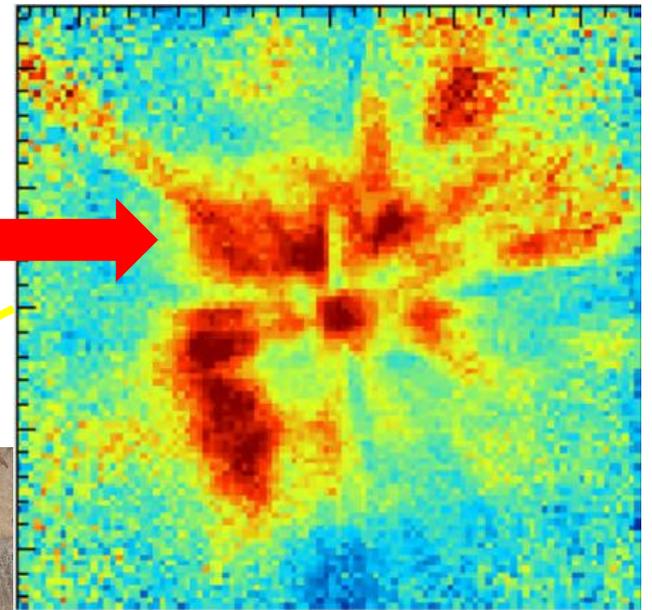
ナポリ大学との共同研究



ギリシャ時代の埋設室と考えられる 未知の空洞を発見！

V. Tioukov, K. Morishima et al., Scientific Reports 13, 5438 (2023)

地下構造の宇宙線イメージ



まとめ

- クフ王のピラミッド内部に4500年間にわたり隠されていた2つの未知の内部空間を発見。そのうちの1つの**北側の通路状の空間に対して多地点宇宙線イメージングを実施し、三次元的な位置と形状を数センチの精度で把握し、ファイバースコープを用いた直接確認に成功！**
- **宇宙線イメージングの遺跡調査への有効性の実証のみならず、宇宙線を用いた学際研究としても大きな意義がある。**
- マヤ遺跡（コパン、ティカル）の王墓の調査も進めている。
- イタリア・ナポリの市街地地下10mにギリシャ時代の未知の埋葬室を発見！
- **宇宙線イメージング考古学は、文理融合・学際研究の新しい研究手法・分野であり、考古遺跡研究における重要な新学術領域となりつつある。**