

宇宙線ミュオンイメージングによる クフ王ピラミッドの新空間の発見

森島 邦博

名古屋大学 大学院理学研究科 μ 研



NHKとの共同製作

「宇宙線」

宇宙空間を飛び交う高エネルギー放射線

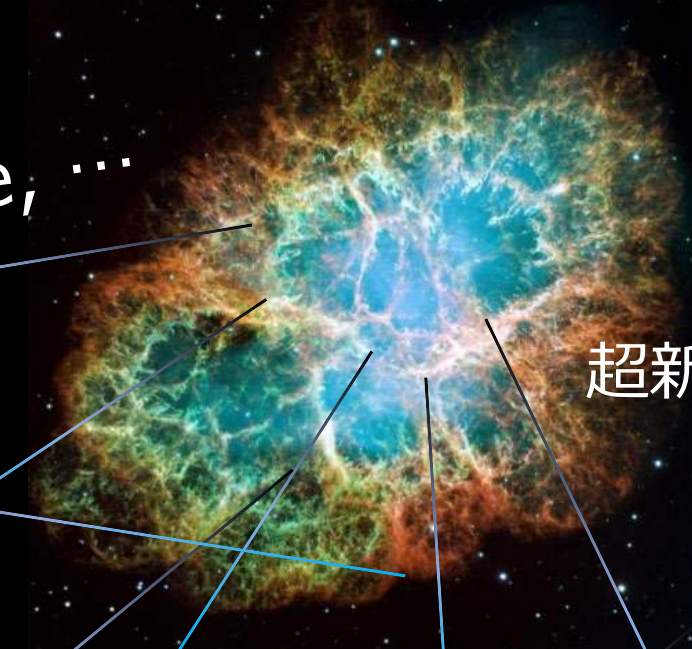


宇宙線の発生源

「かに星雲」



H, He, ..., Fe, ...



超新星爆発 → 超新星残骸

太陽よりも重い星の爆発

天然の加速器

様々な原子が生成されて
放出される



地表面から見た宇宙線

宇宙線シャワー

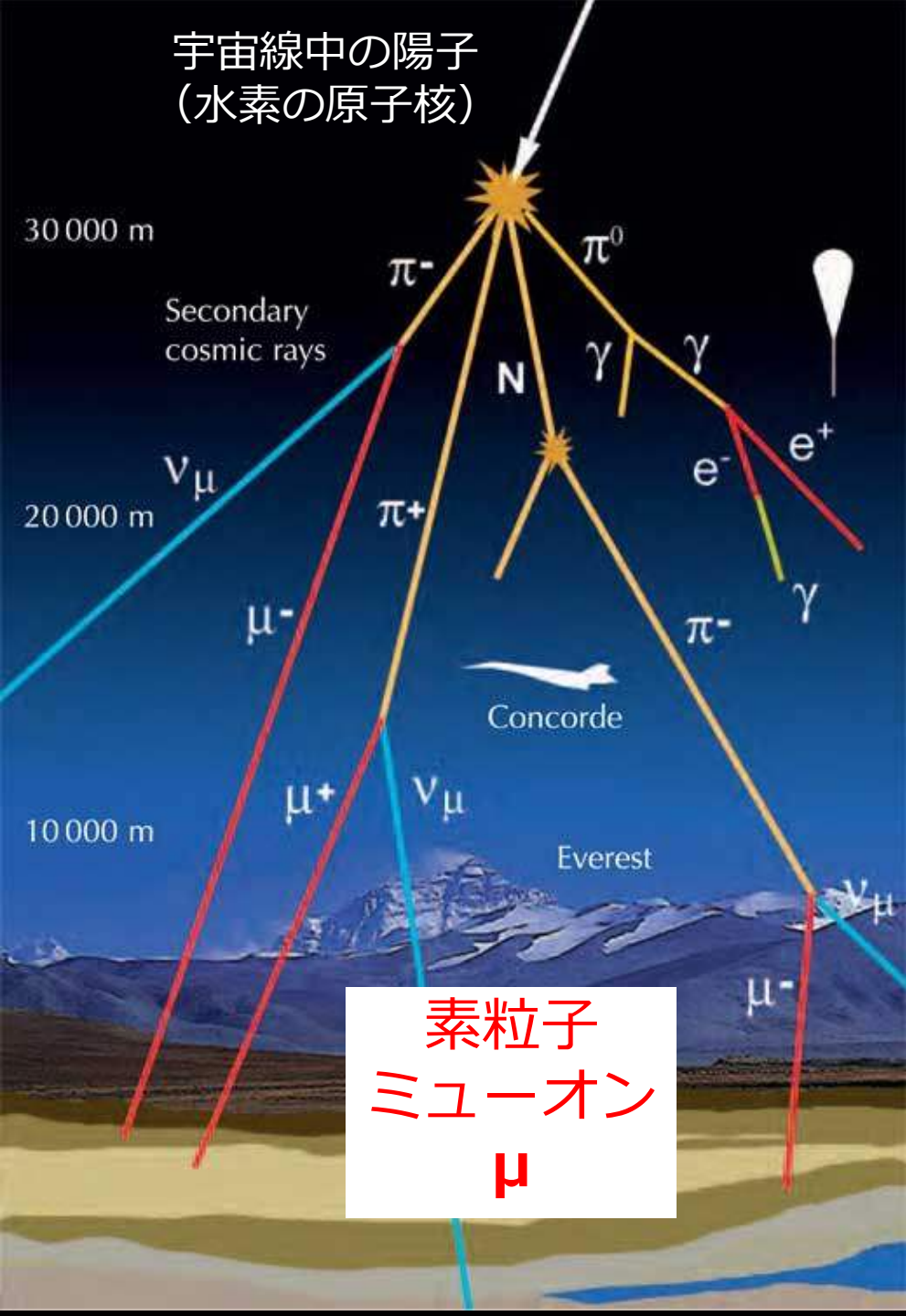


ミューオン

μ \pm

質量 : $105.6 \text{ MeV}/c^2$
(電子の約207倍)

宇宙線中の陽子
(水素の原子核)



素粒子
ミューオン
 μ

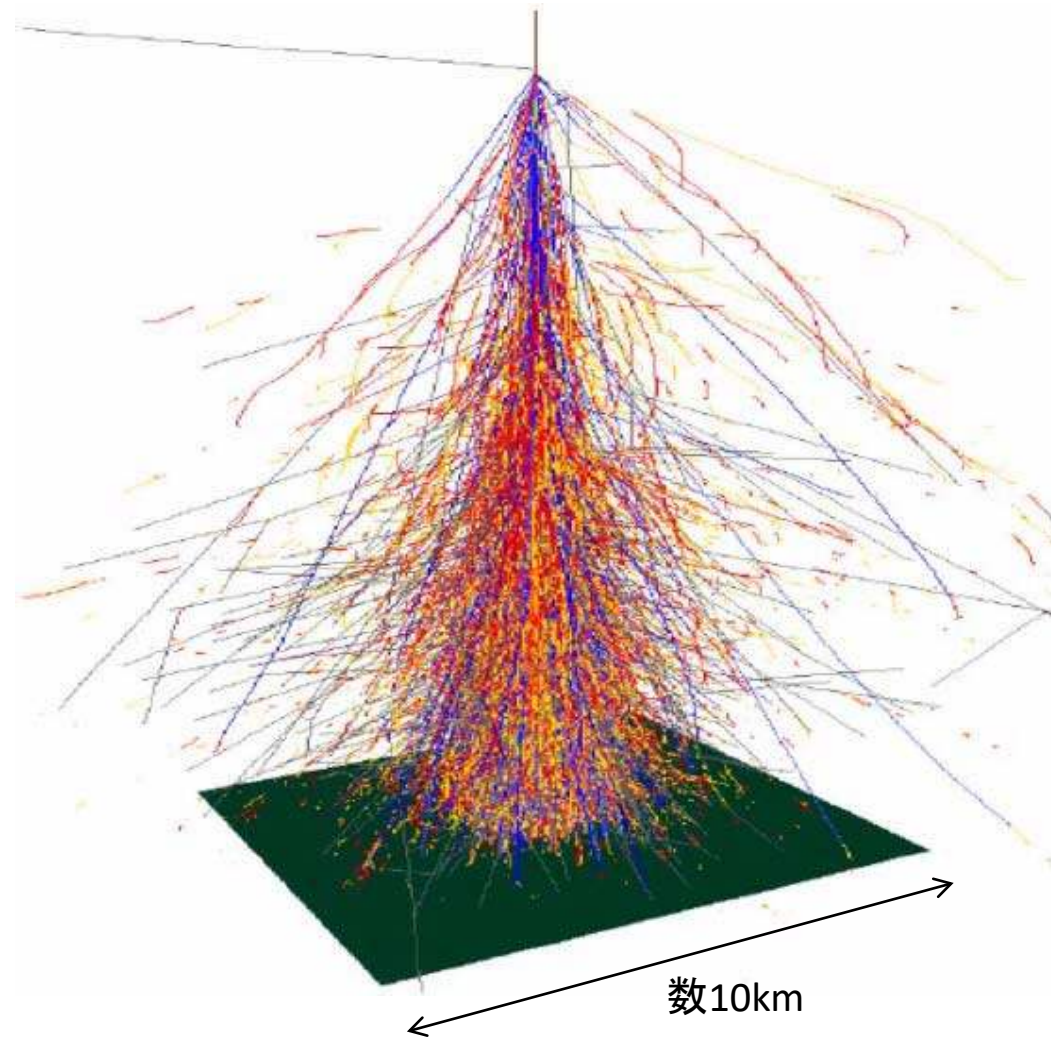
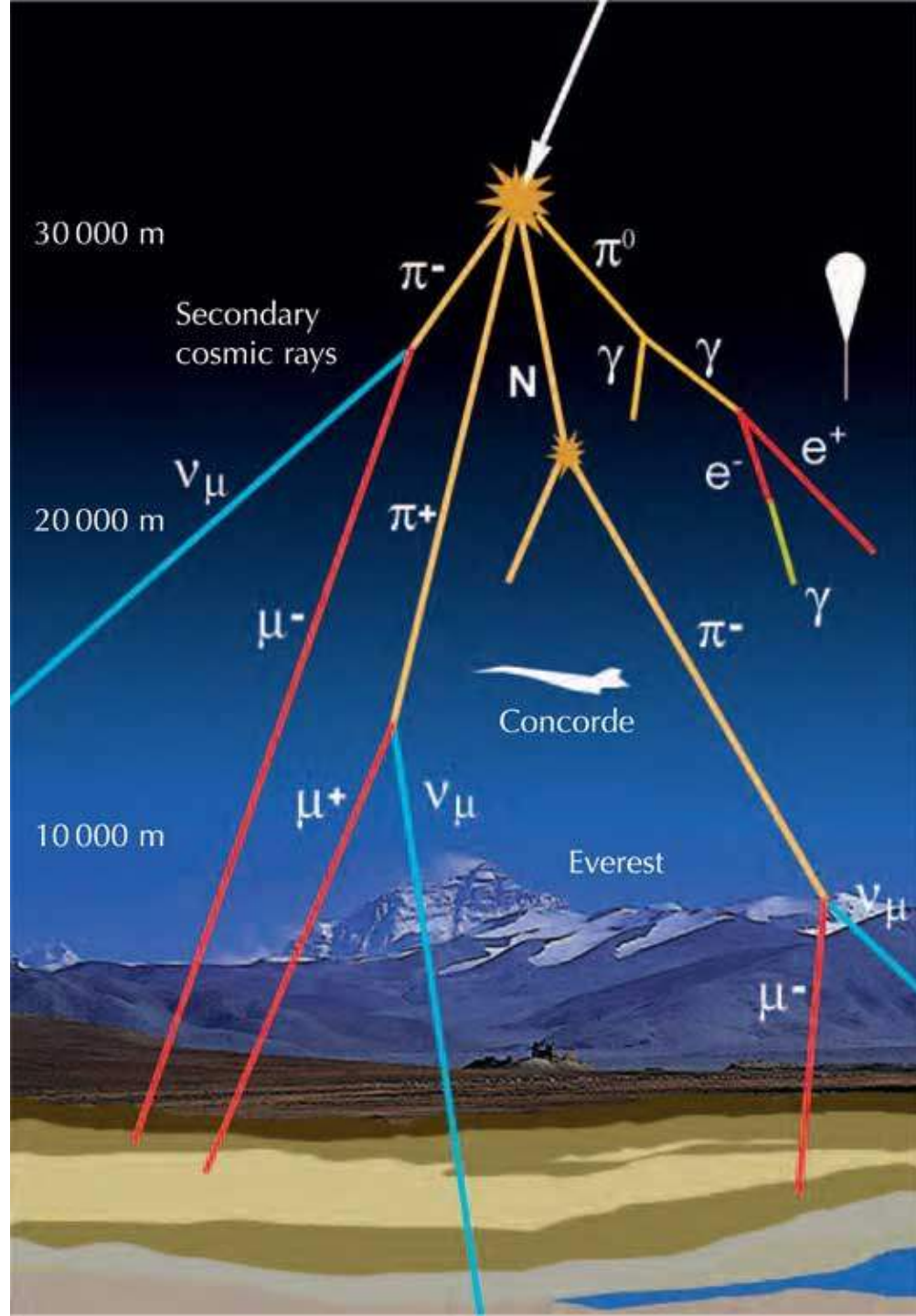
面から見た宇宙線

宇宙線シャワー

大半がミューオンとして降り注ぐ

ミューオンは、電子の仲間
電子と同じ性質を持つが、約200倍の質量の粒子

宇宙線エアシャワー

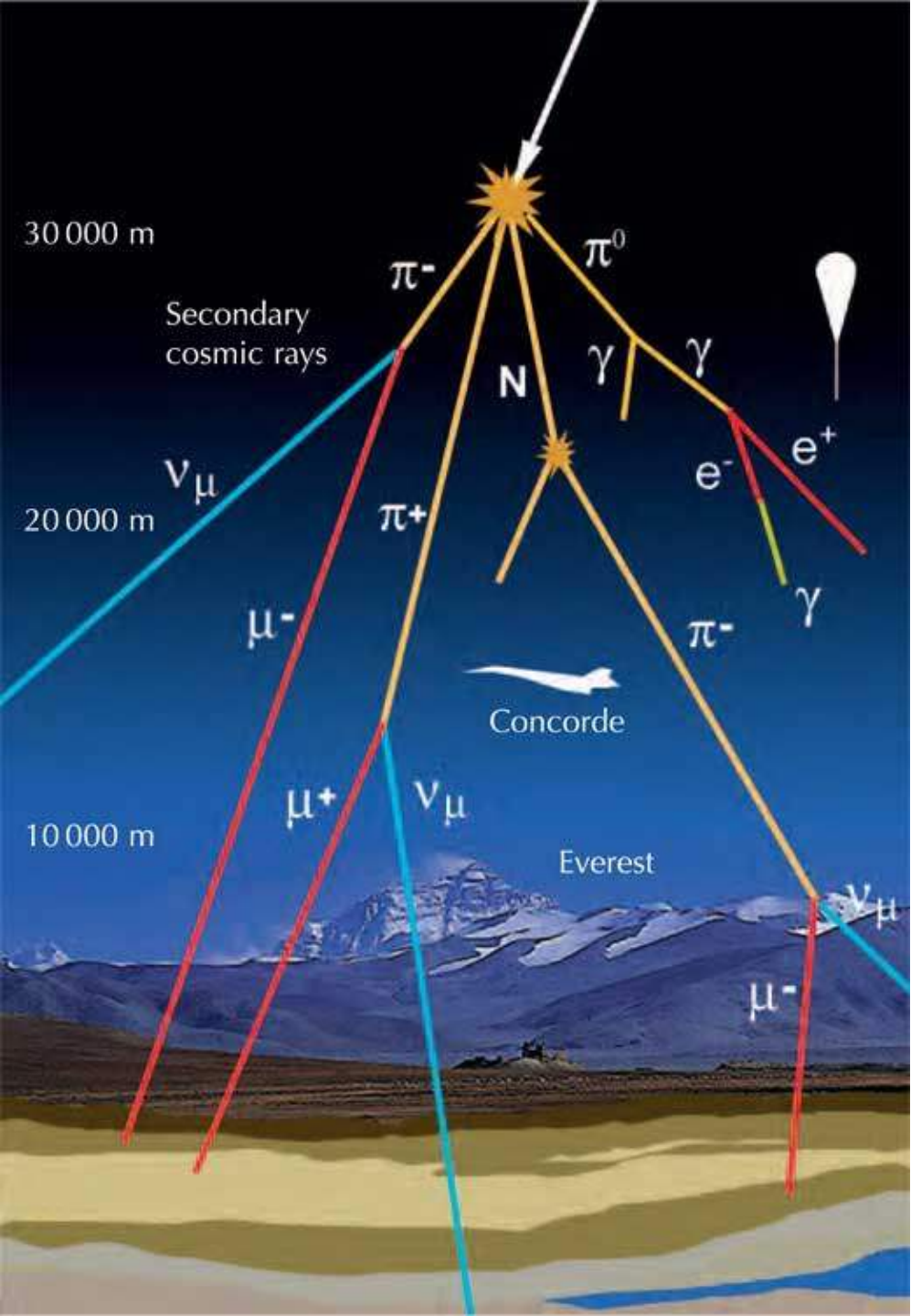


宇宙線

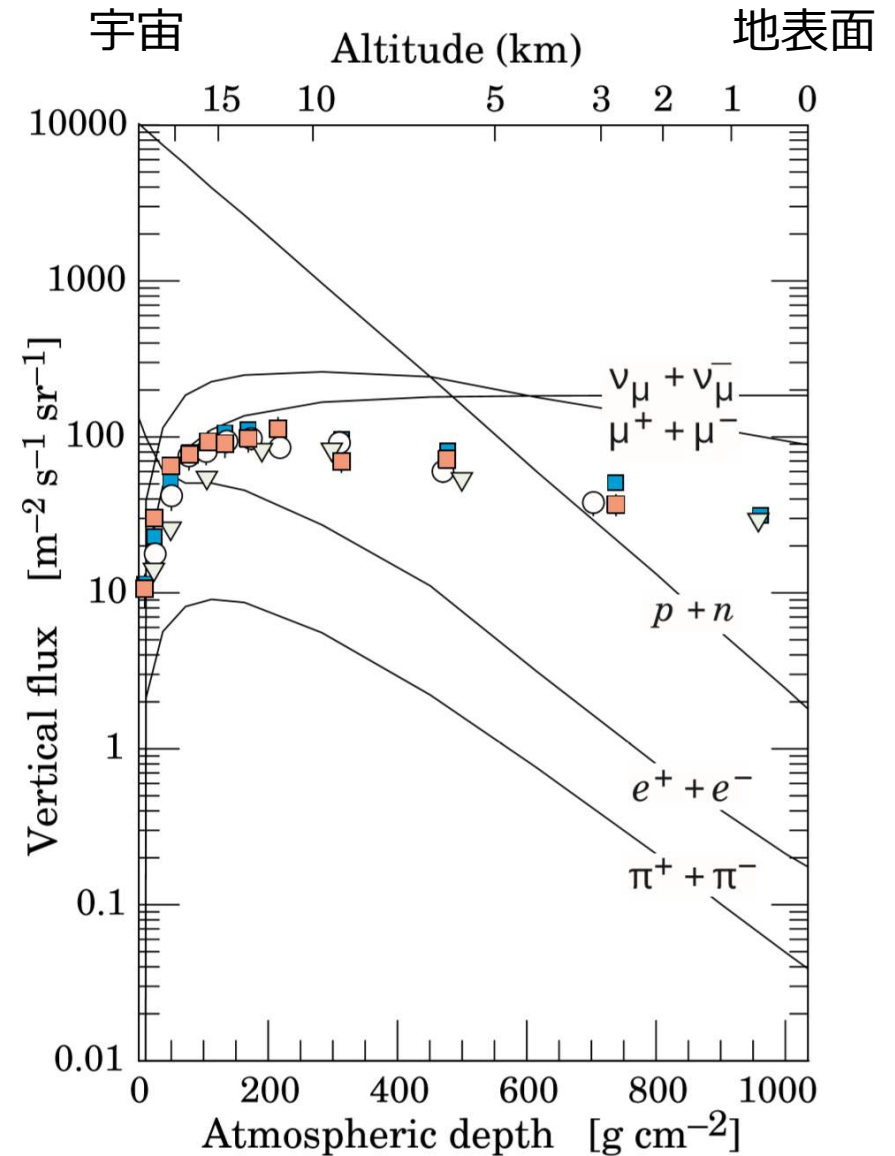
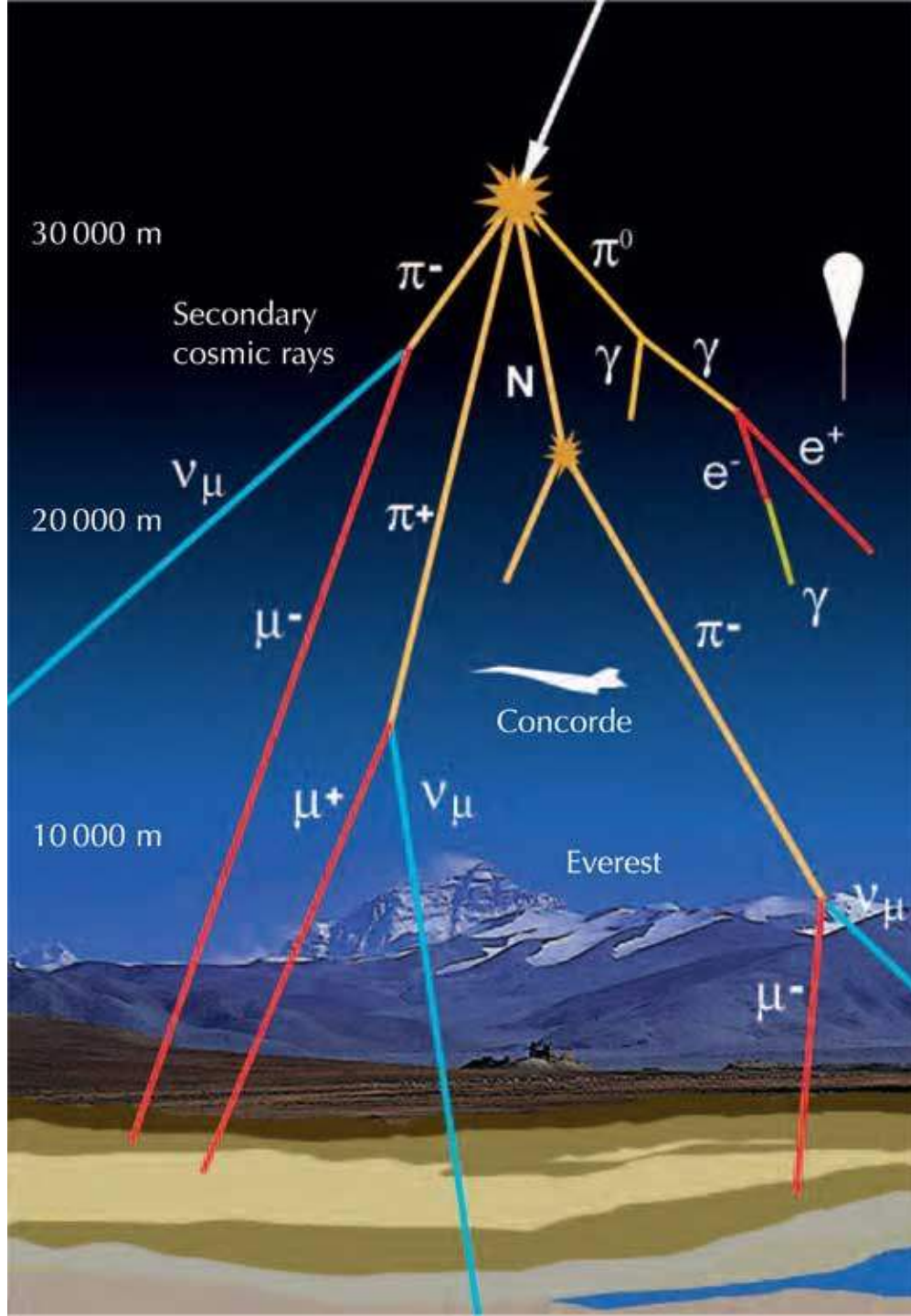
荷電レプトン

名称	記号	質量 (MeV/c ²)	寿命 (sec)
電子	e	0.5	—
ミューオン	μ	105.7	2.2×10^{-6}
タウ	τ	1776.8	2.9×10^{-13}

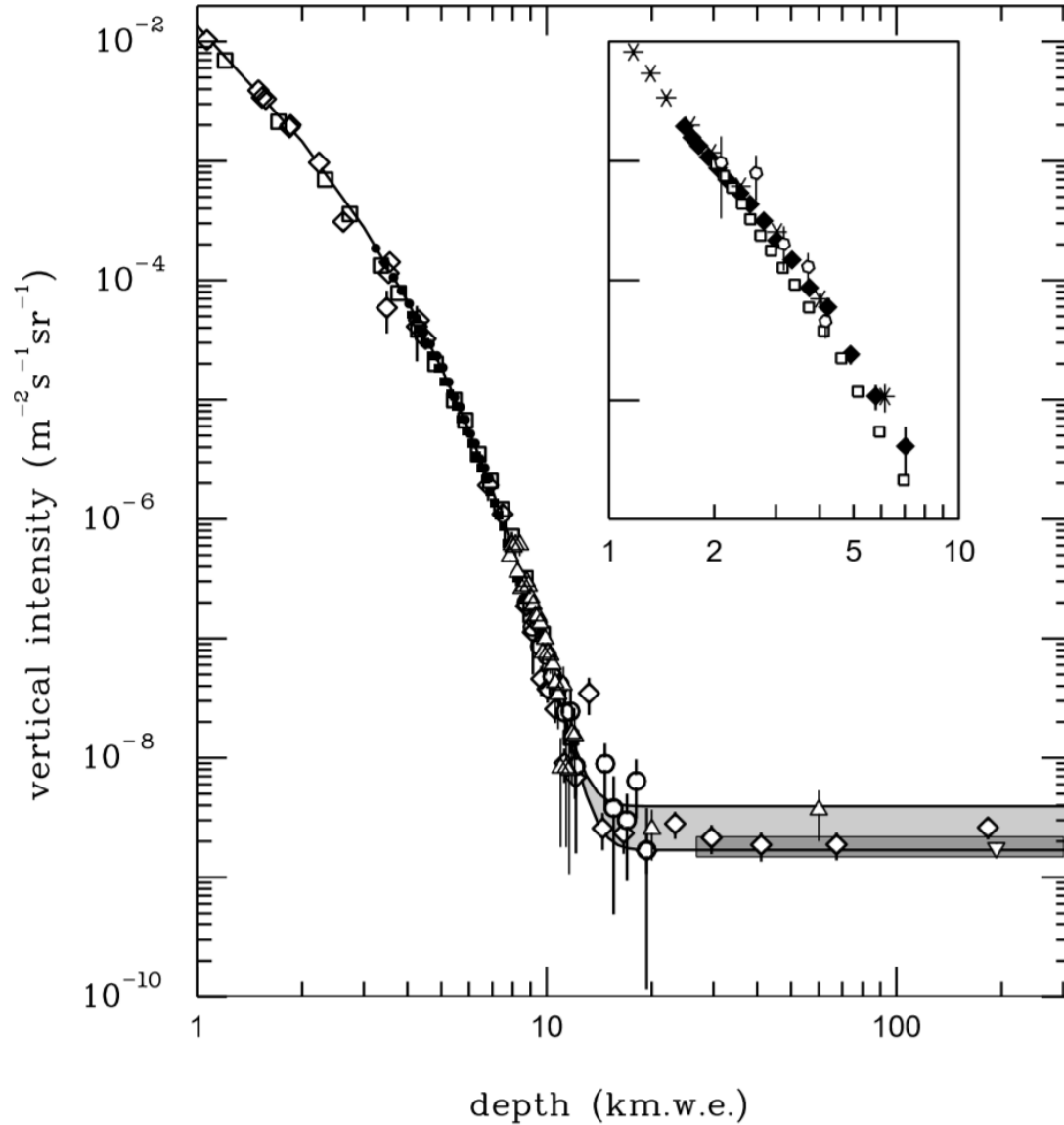
ミューオンの質量は電子の約200倍



宇宙線ミュオン



宇宙線ミュオンフラックス（鉛直方向）の深度依存性



水 10km ~ 岩盤 3km

Cosmic Rays Measure Overburden of Tunnel

- Fig. 1—Geiger counter "telescope" in operation in the Guthega-Munyang tunnel. From left are Dr. George and his assistants, Mr. Lehane and Mr. O'Neill.

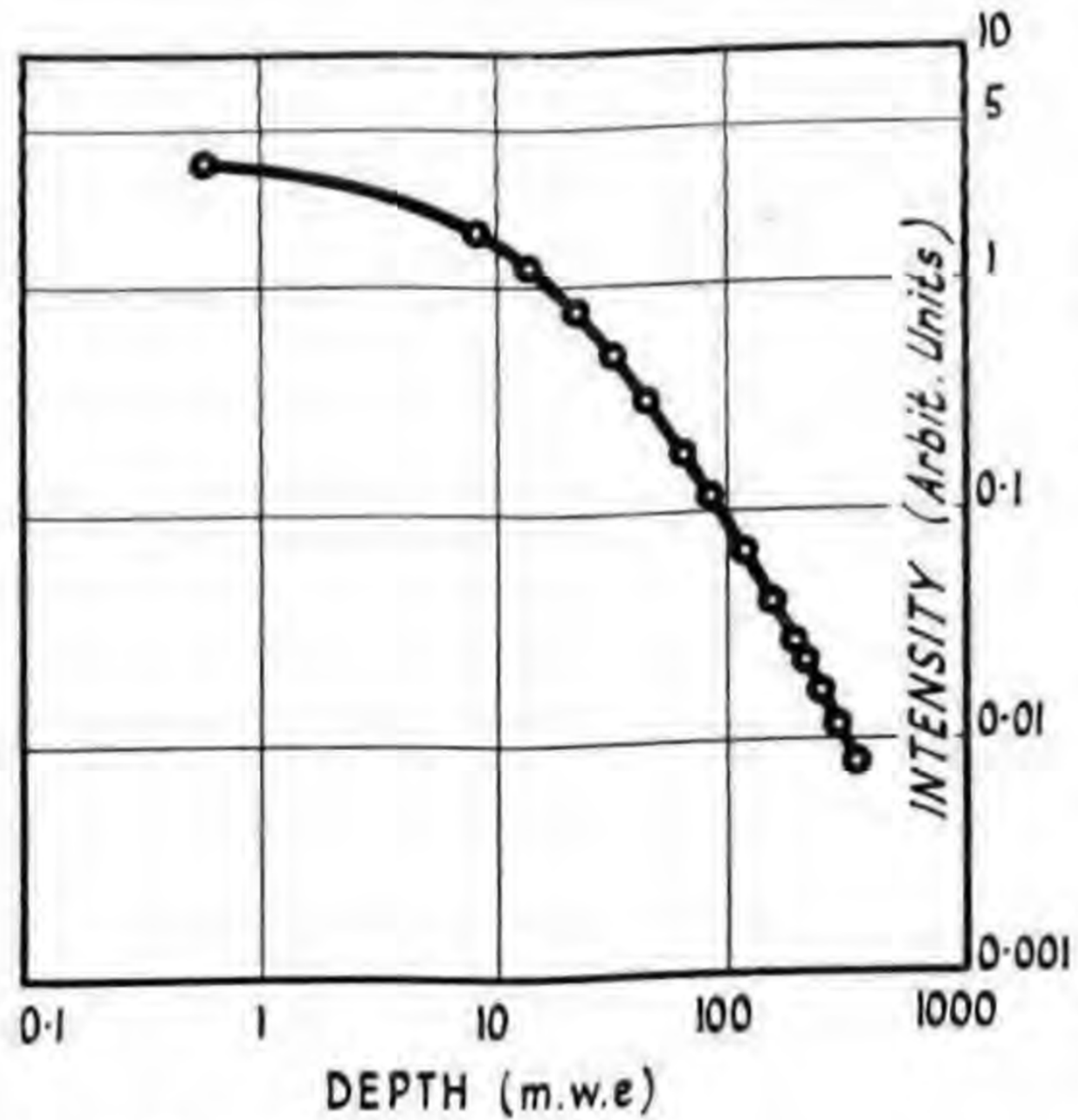


Geiger counter telescope used for mass determination at Guthega project of Snowy Scheme . . . Equipment described


Published in 1955

By Dr. E. P. George¹⁾
University of Sydney, N.S.W.

● Fig. 3—Geiger counter unit.



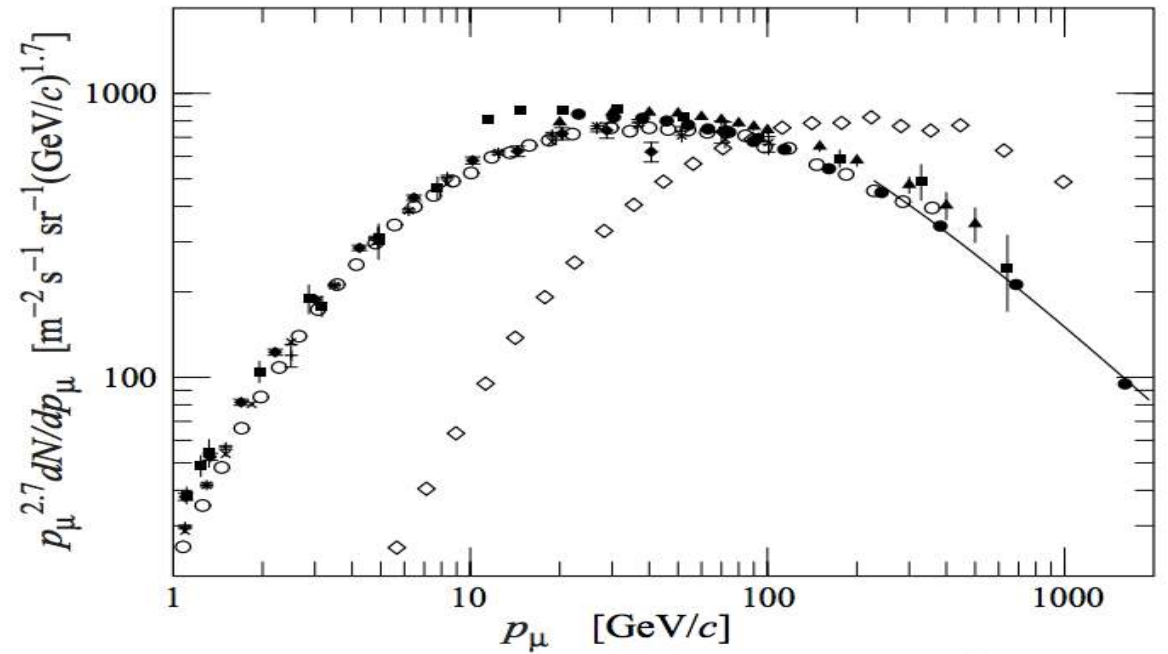
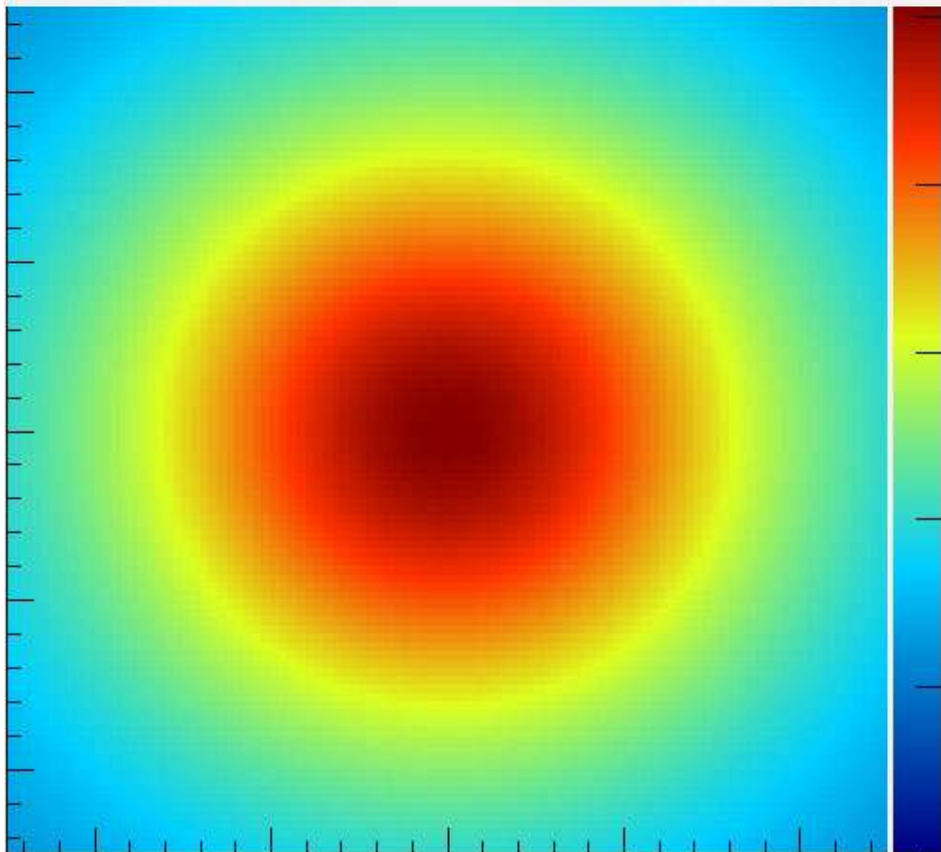
● Fig. 4—Calibration curve.

- 
- A photograph of a crowd of people at night, likely at a festival or event. The background is filled with out-of-focus, warm-toned lights (yellow and orange) and some blue light streaks. The people in the foreground are mostly seen from the back or side, looking towards the right. The overall atmosphere is dark and festive.
- ★宇宙線は最大で数キロメートルもの物質を透過
 - ★物質を透過すると数が減少

宇宙線ミュオン

飛来方向分布 (>1GeV)

エネルギースペクトル

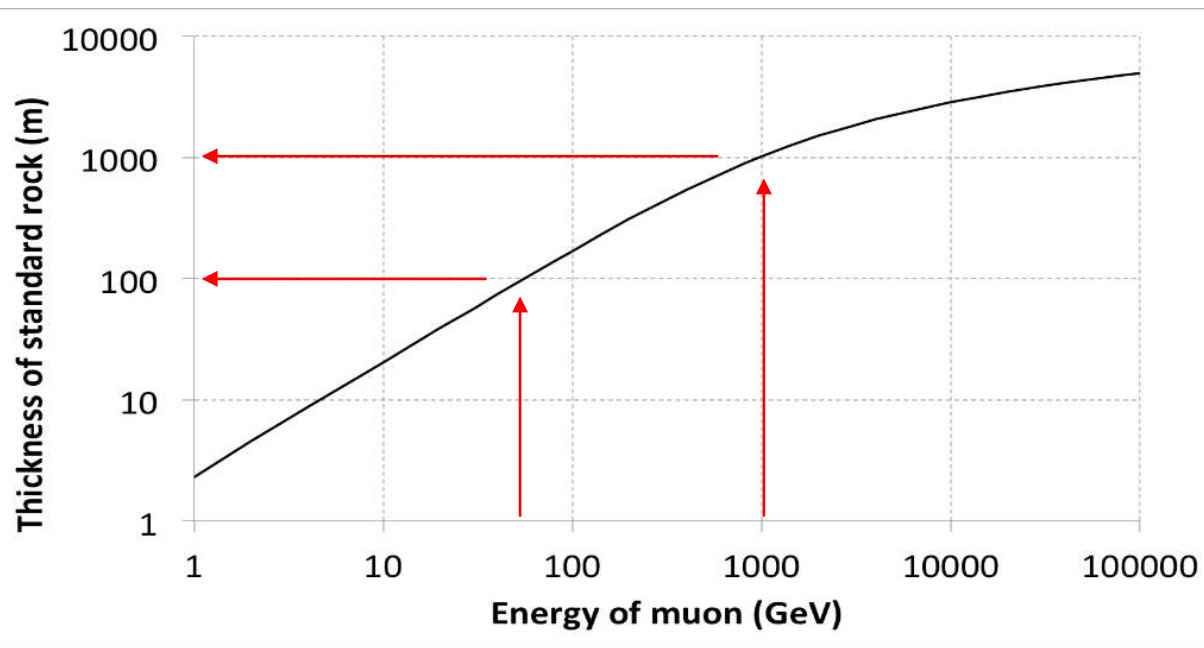


幅広い分布

宇宙線ミュオン

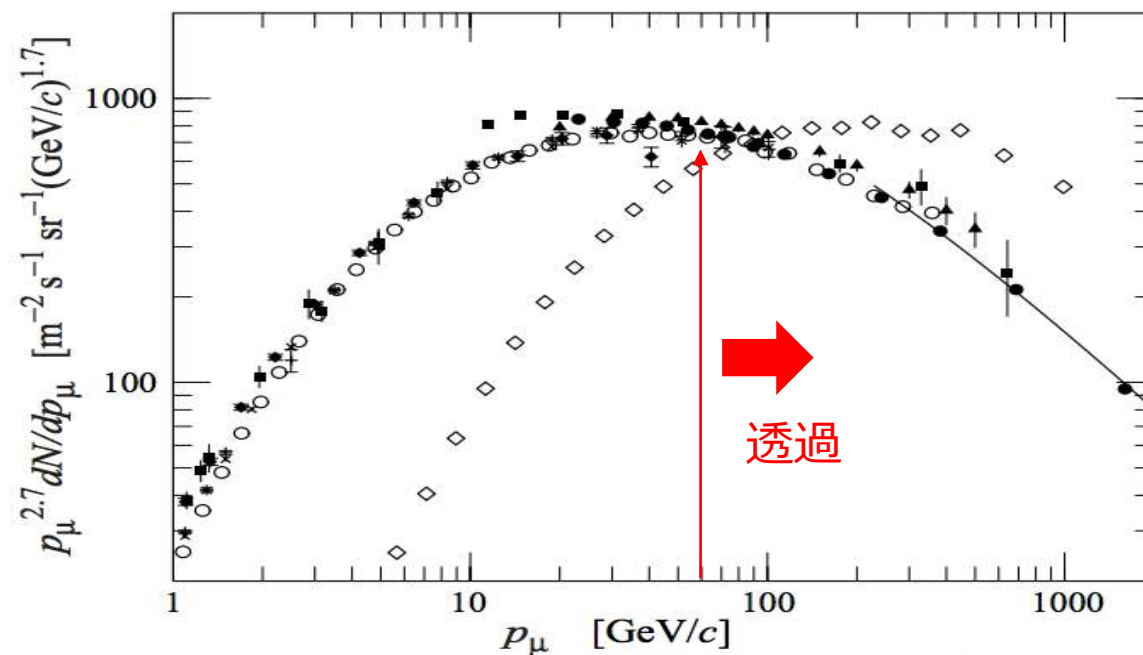
ミュオンの透過性

(標準岩盤 Standard Rock: 密度 = 2.65g/cm³)



高い物質透過性

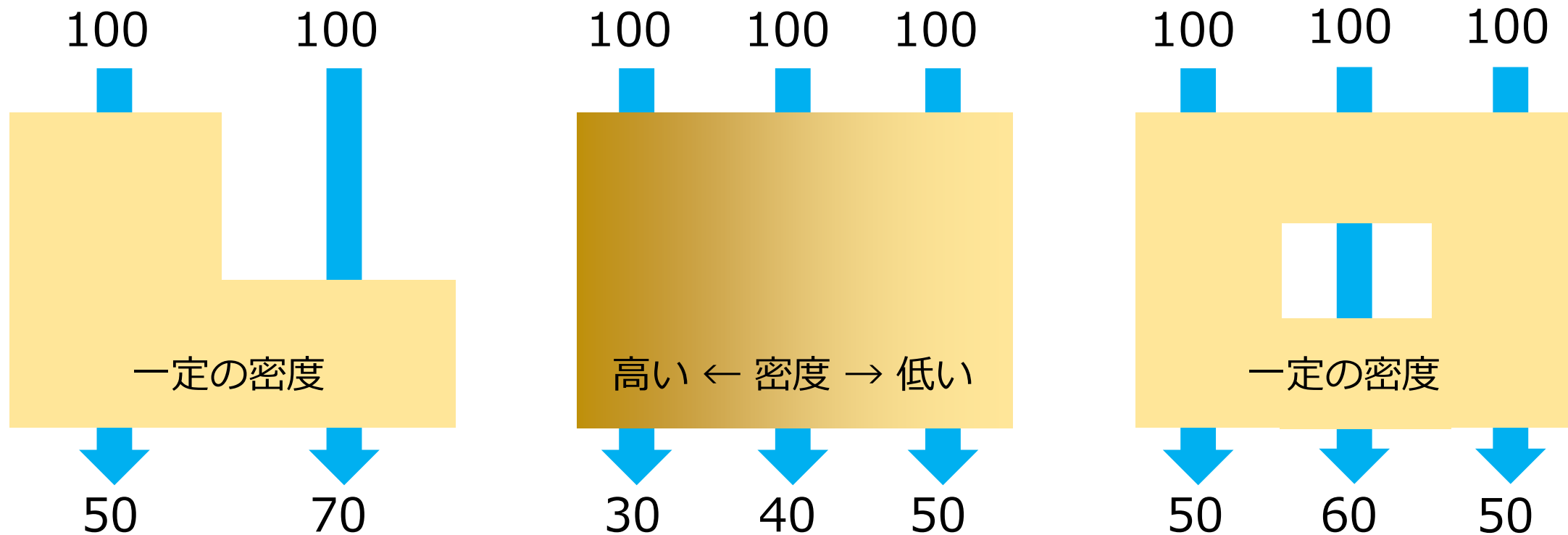
エネルギースペクトル



幅広い分布

宇宙線ミューオンの性質

物質を透過すると数が減少！



物質を透過するミューオンの数は、物体内部の構造を反映

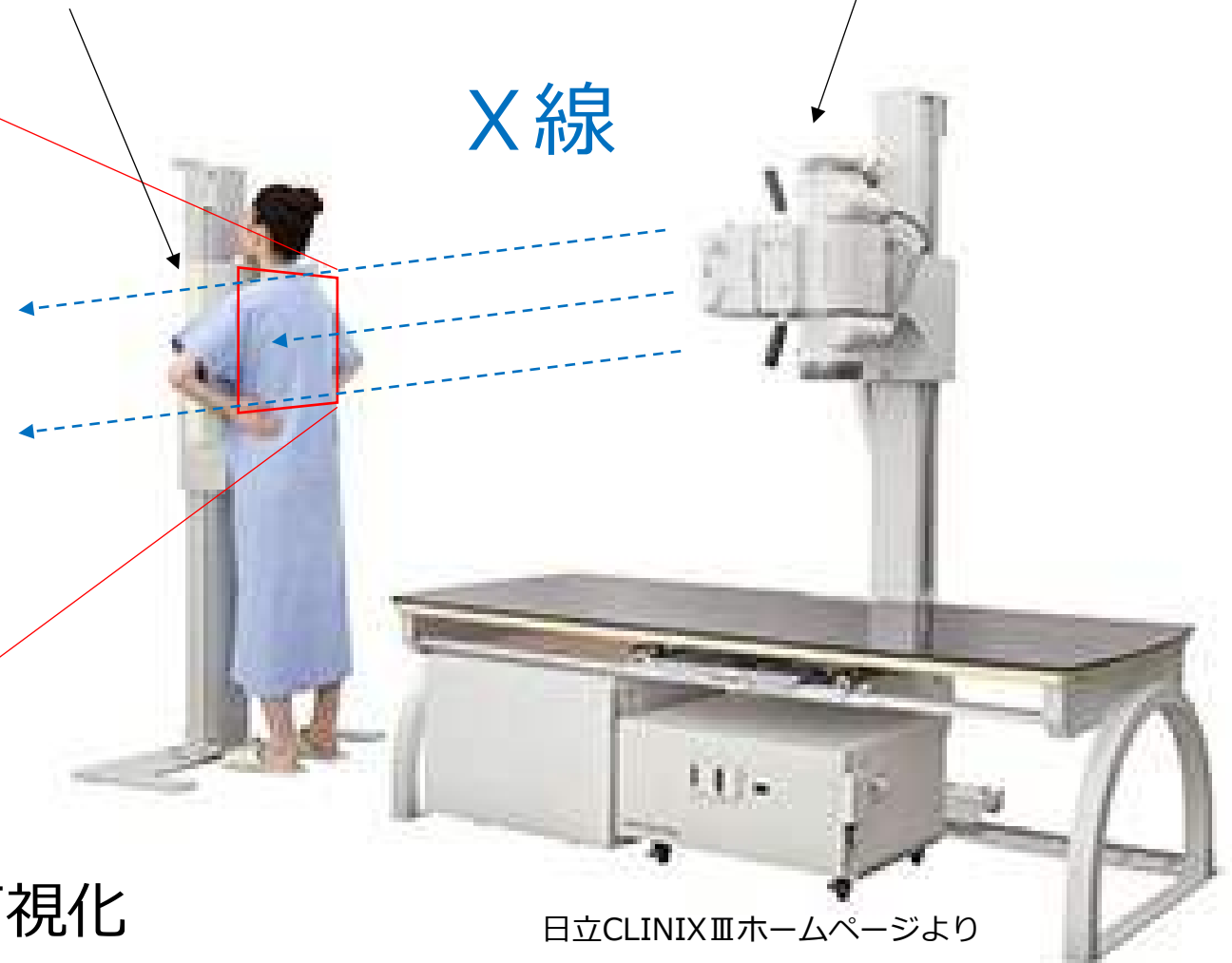
X線検査 (レントゲン撮影)

レントゲン写真



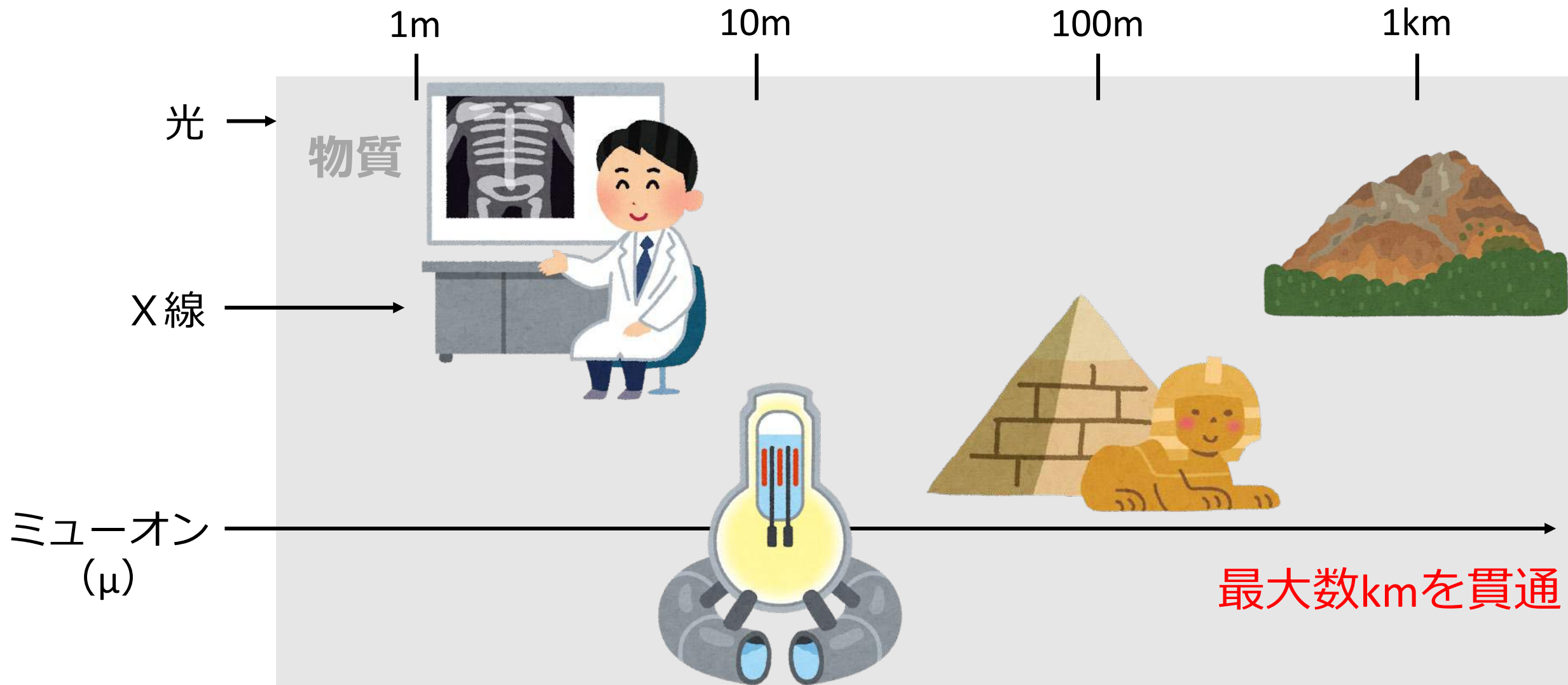
X線を撮影する装置
(X線フィルムなど)

X線発生装置



骨と肉の密度の差 (コントラスト) を可視化

X線とミュオン



X線とミュオン

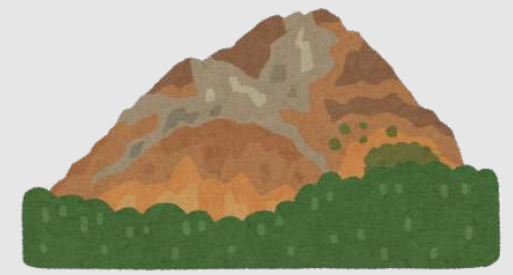
1m

10m

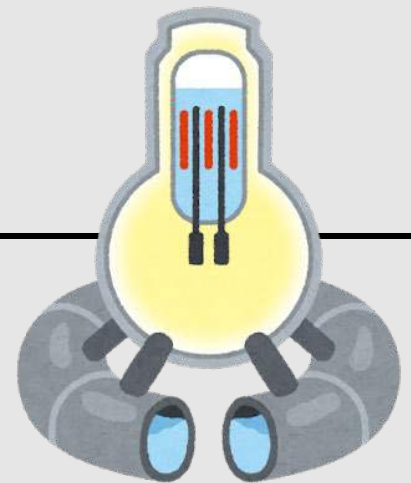
100m

1km

X線では『見る』ことが出来ない厚い物体の内部を宇宙線ミュオンで透視する技術を「宇宙線イメージング」と呼ぶ

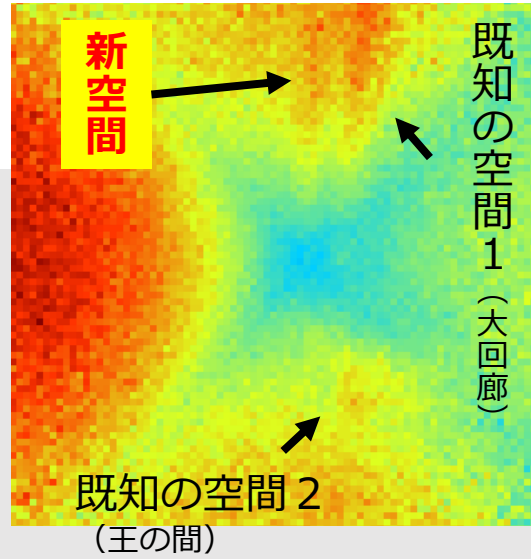
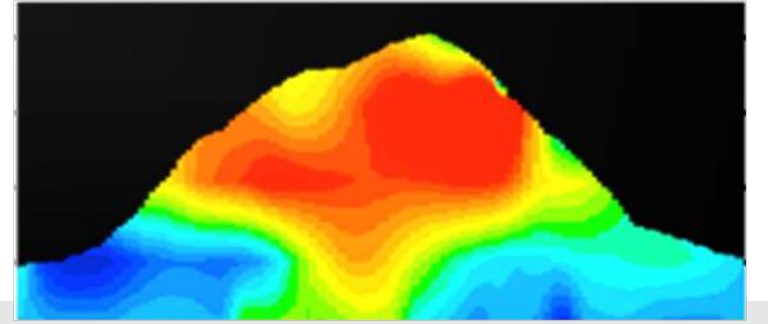


ミュオン
(μ)

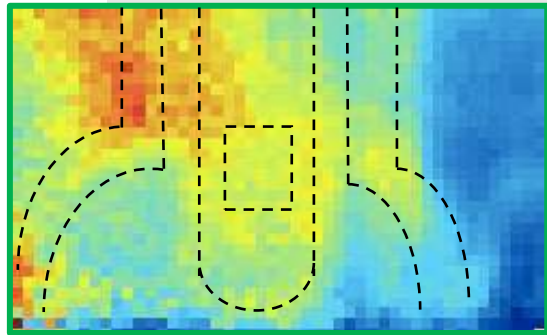


最大数kmを貫通

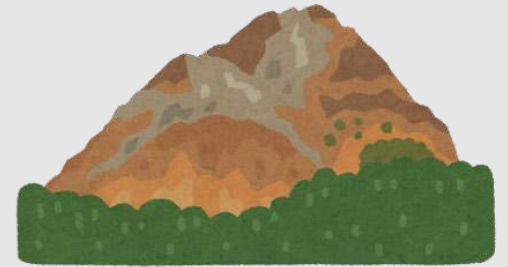
宇宙線イメージング



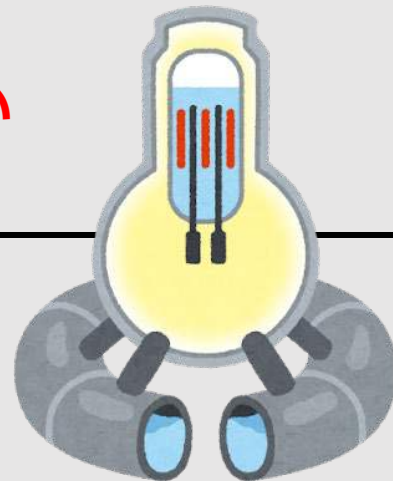
福島第一2号機



炉心部に水と燃料は残っていない



ミューオン
(μ)



最大数kmを貫通

特殊な写真フィルム「原子核乾板」を用いて 宇宙線ミュオンを計測

写真フィルム



X線フィルム



原子核乾板

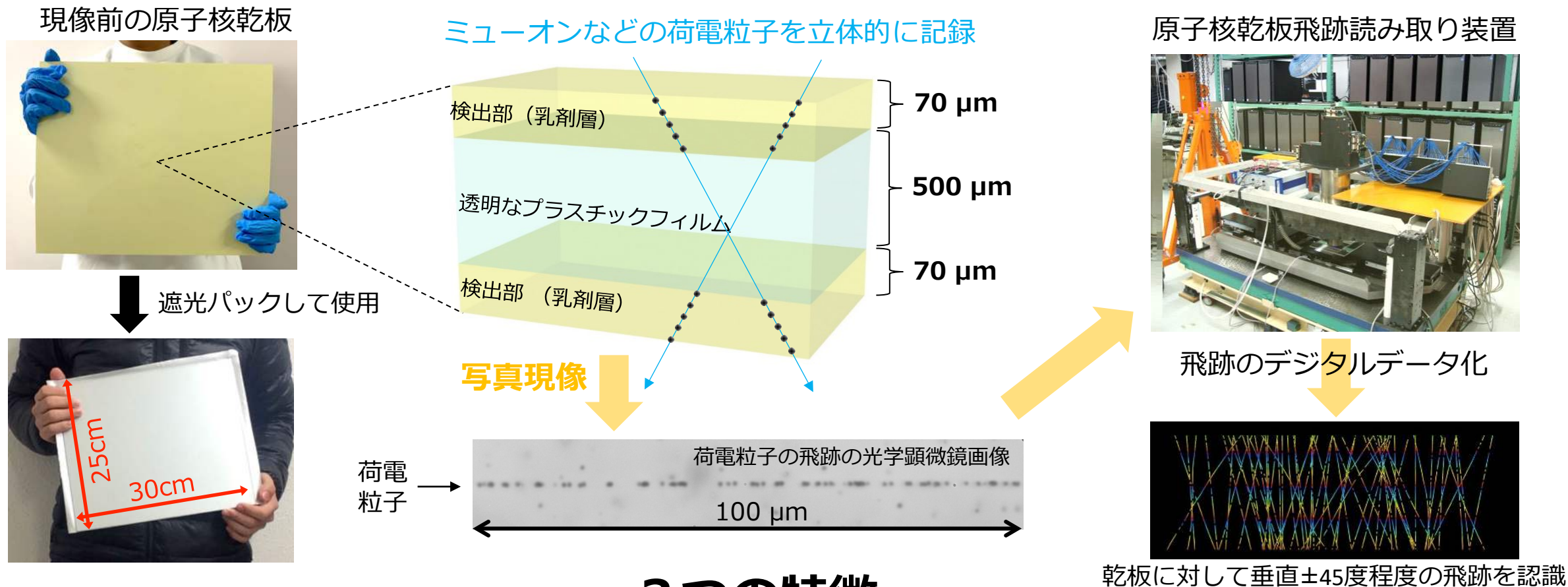


低い

感度

高い

アナログとデジタルが融合した原子核乾板技術



3つの特徴

超高精度三次元測定

- ・サブミクロンの三次元位置精度
- ・サブミリラジアン of 角度精度

可搬性・耐久性

- ・軽量、コンパクト、電源不要
- ・防水・防塵仕様

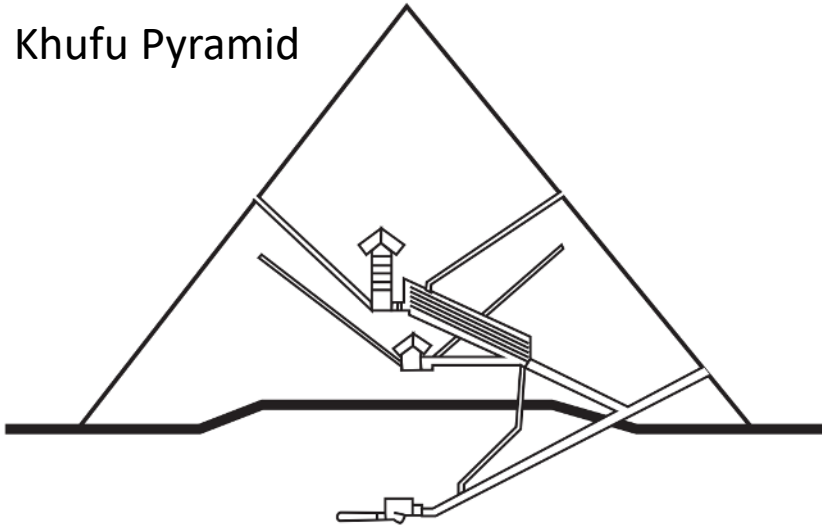
拡張性

- ・高い生産性
- ・大面積化、多地点同時観測を実現

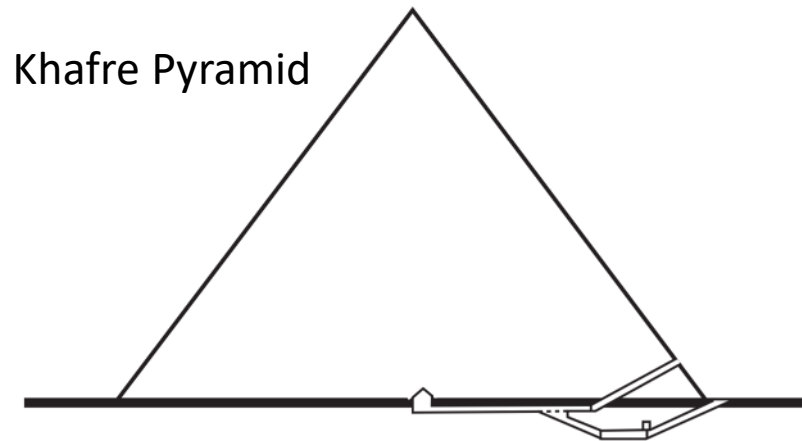
ギザの三大ピラミッド

ピラミッドの内部構造の謎

Khufu Pyramid

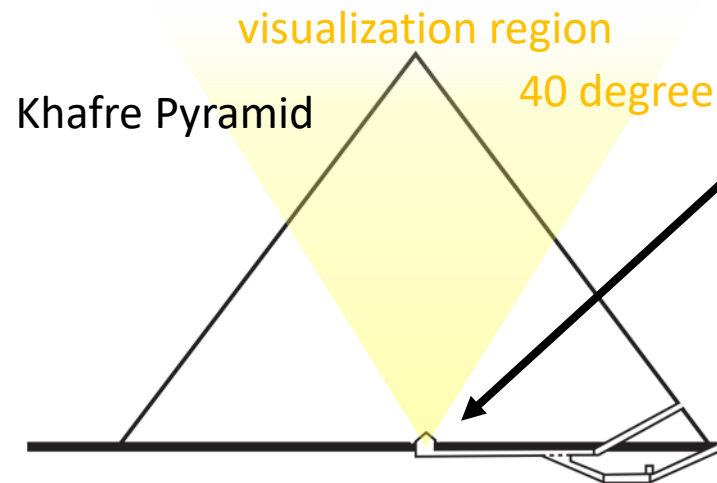
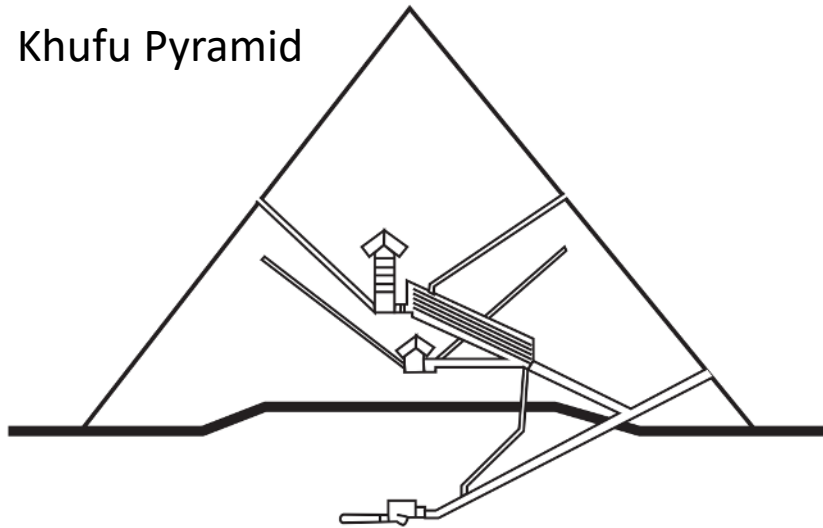


Khafre Pyramid

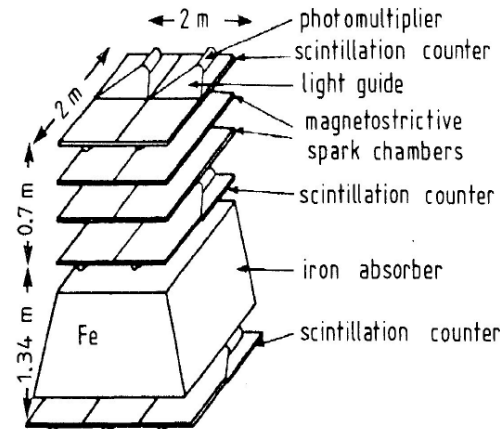
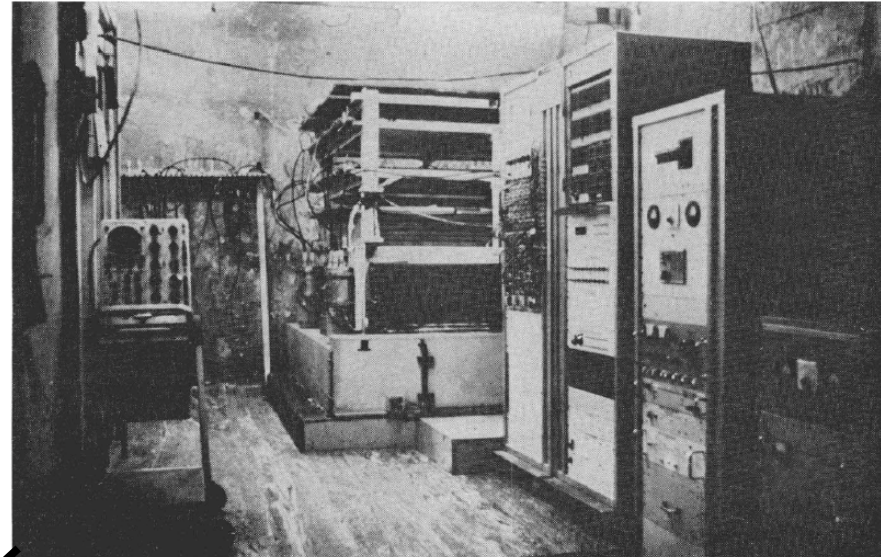


The first cosmic-ray imaging of Khafre Pyramid by Alvarez et al. (1970)

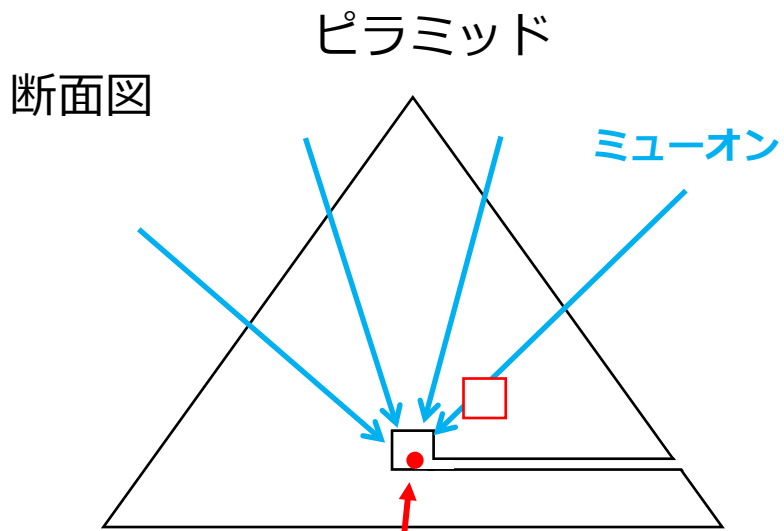
L. W. Alvarez, Science, 167, 3919, 832-839



Belzoni Chamber に設置されたスパークチェンバー

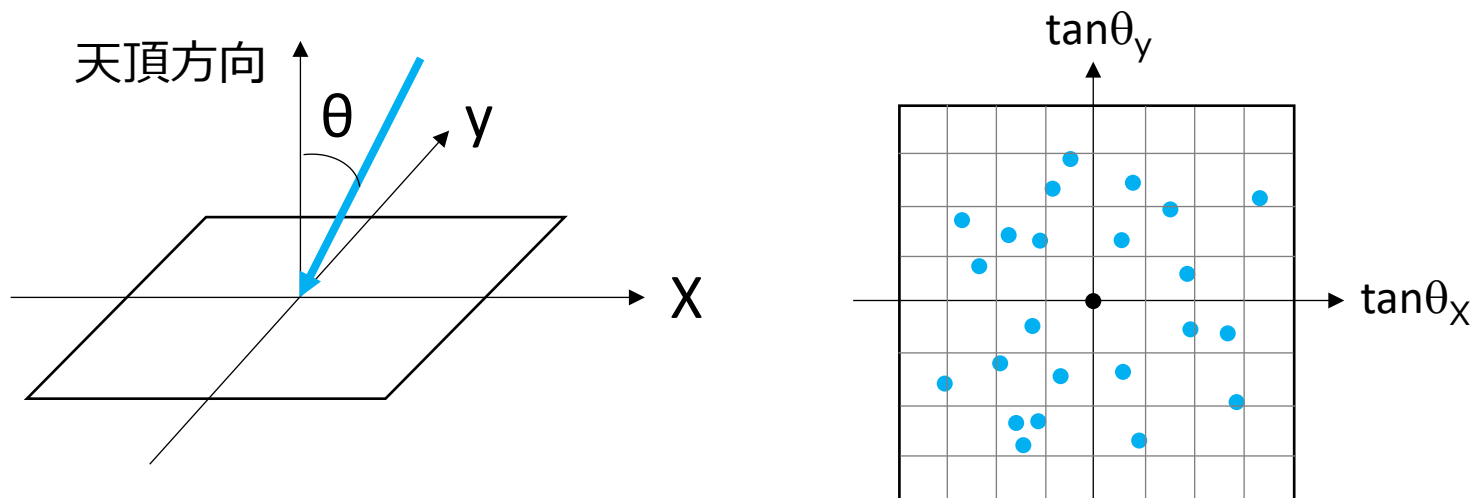
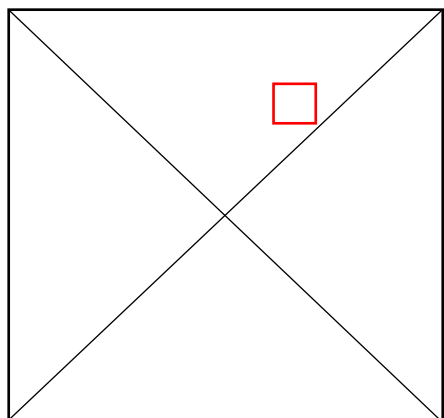


ピラミッドの宇宙線イメージング



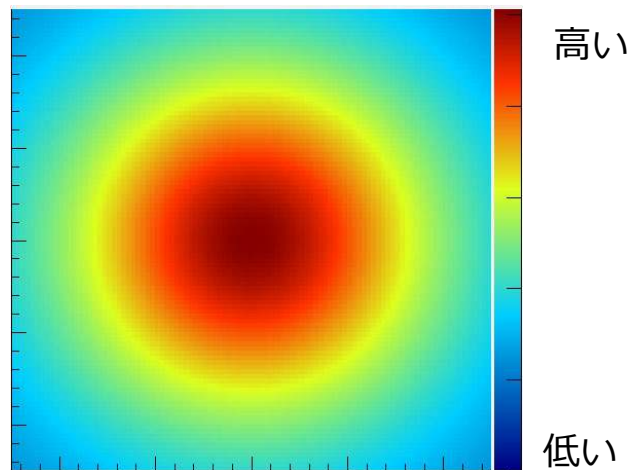
検出器: ミューオンの位置と角度を三次元的に測定

上面図

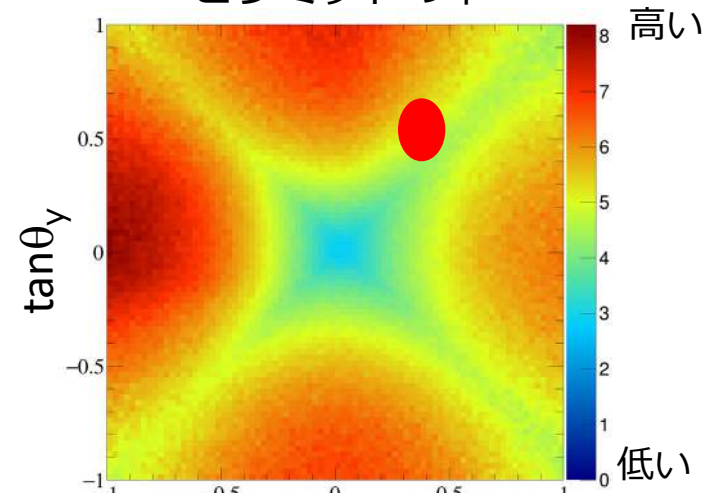


宇宙線ミュオンの飛来方向分布

地表面

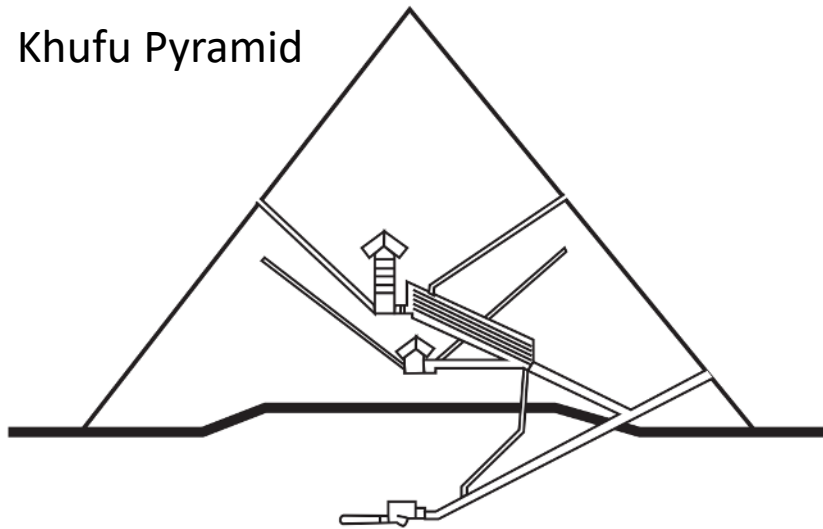


ピラミッドの中

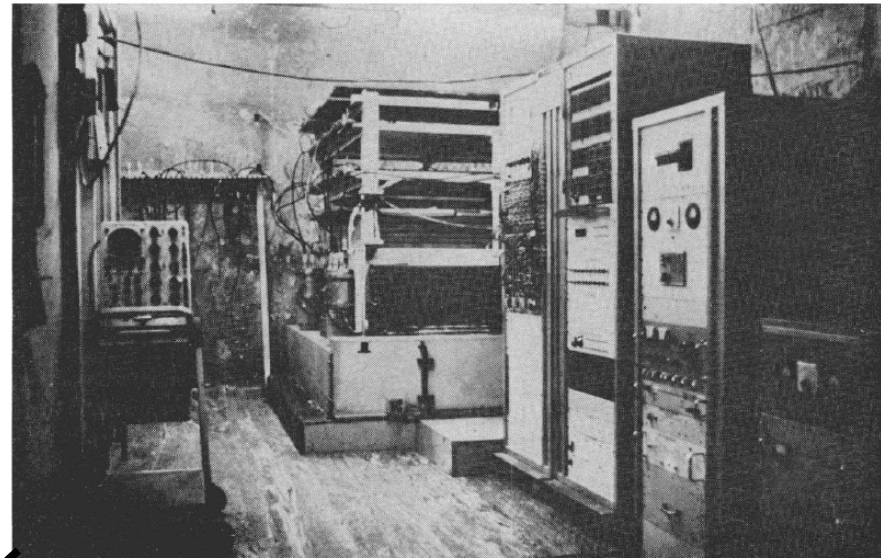


The first cosmic-ray imaging of Khafre Pyramid by Alvarez et al. (1970)

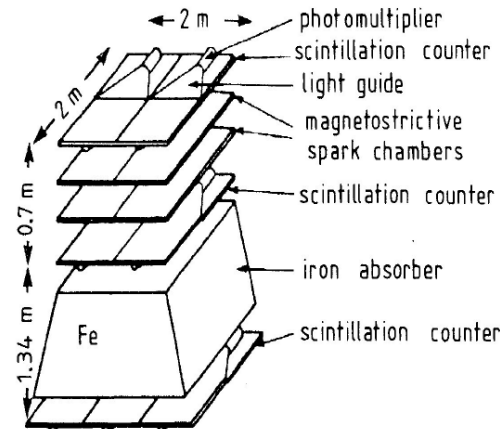
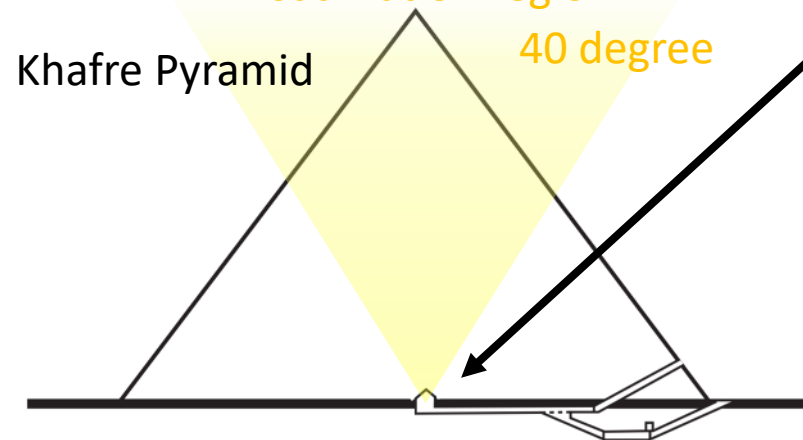
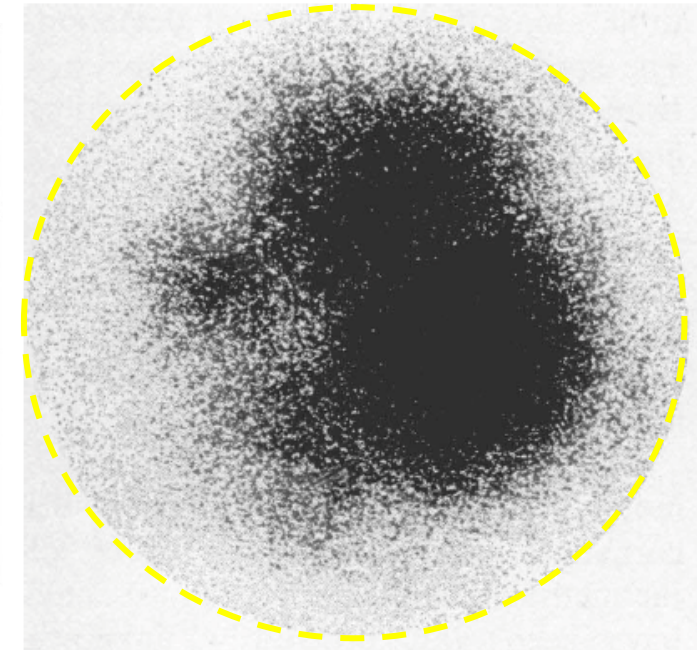
L. W. Alvarez, Science, 167, 3919, 832-839



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

クフ王のピラミッド

4500 年前に建造

高さ: 147m

幅: 230m



ScanPyramids (2015年～)

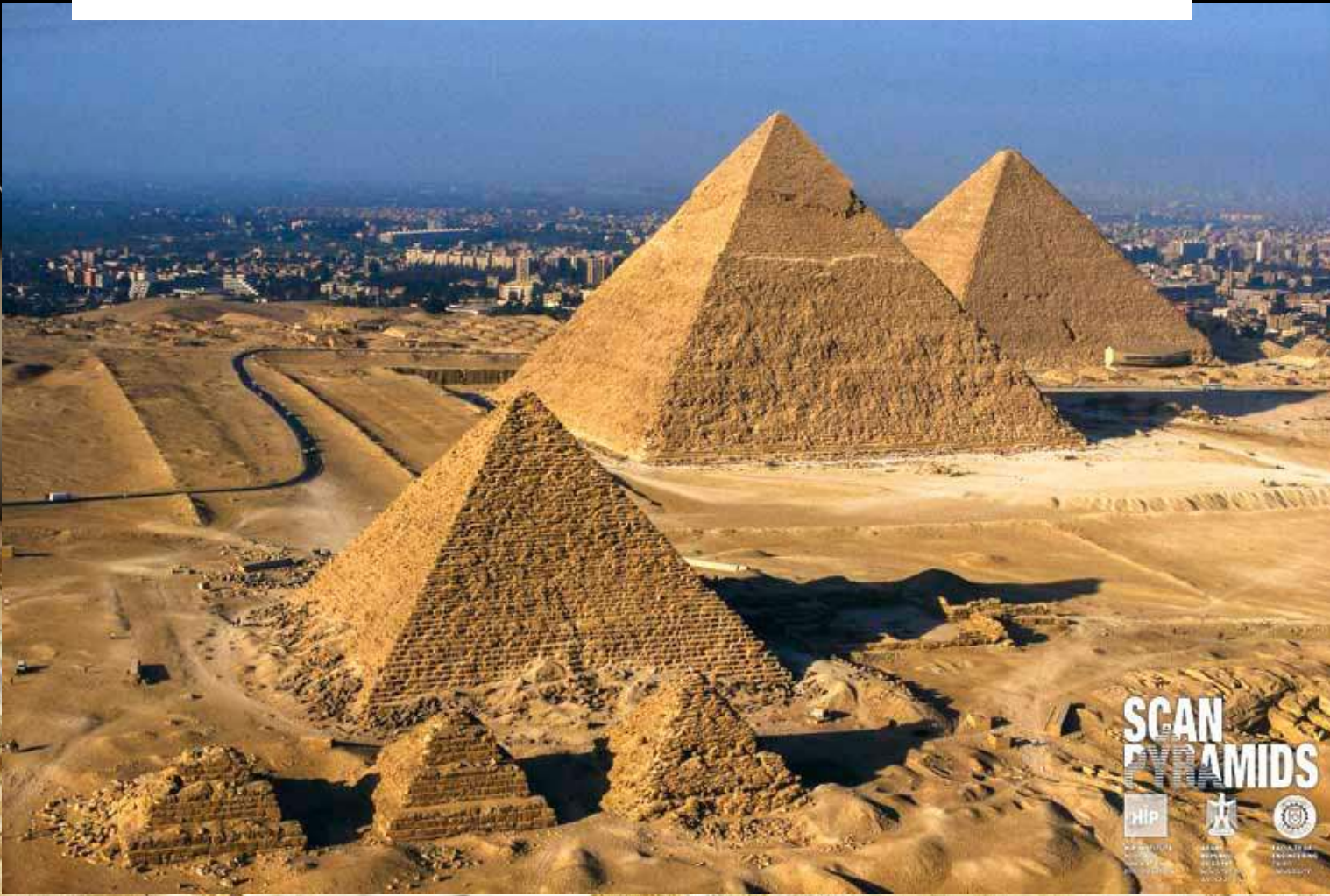
エジプト考古省・カイロ大学が運営

参加国：日本、エジプト、フランス、ドイツなど

参加研究機関：名古屋大学、KEK、CEA

ピラミッド内部の 未知構造の探査

異分野融合国際共同研究



ScanPyramids (2015年～)

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、ドイツなど

参加研究機関：名古屋大学、KEK、CEA

ピラミッド内部の 未知構造の探査



異分野融合国際共同研究

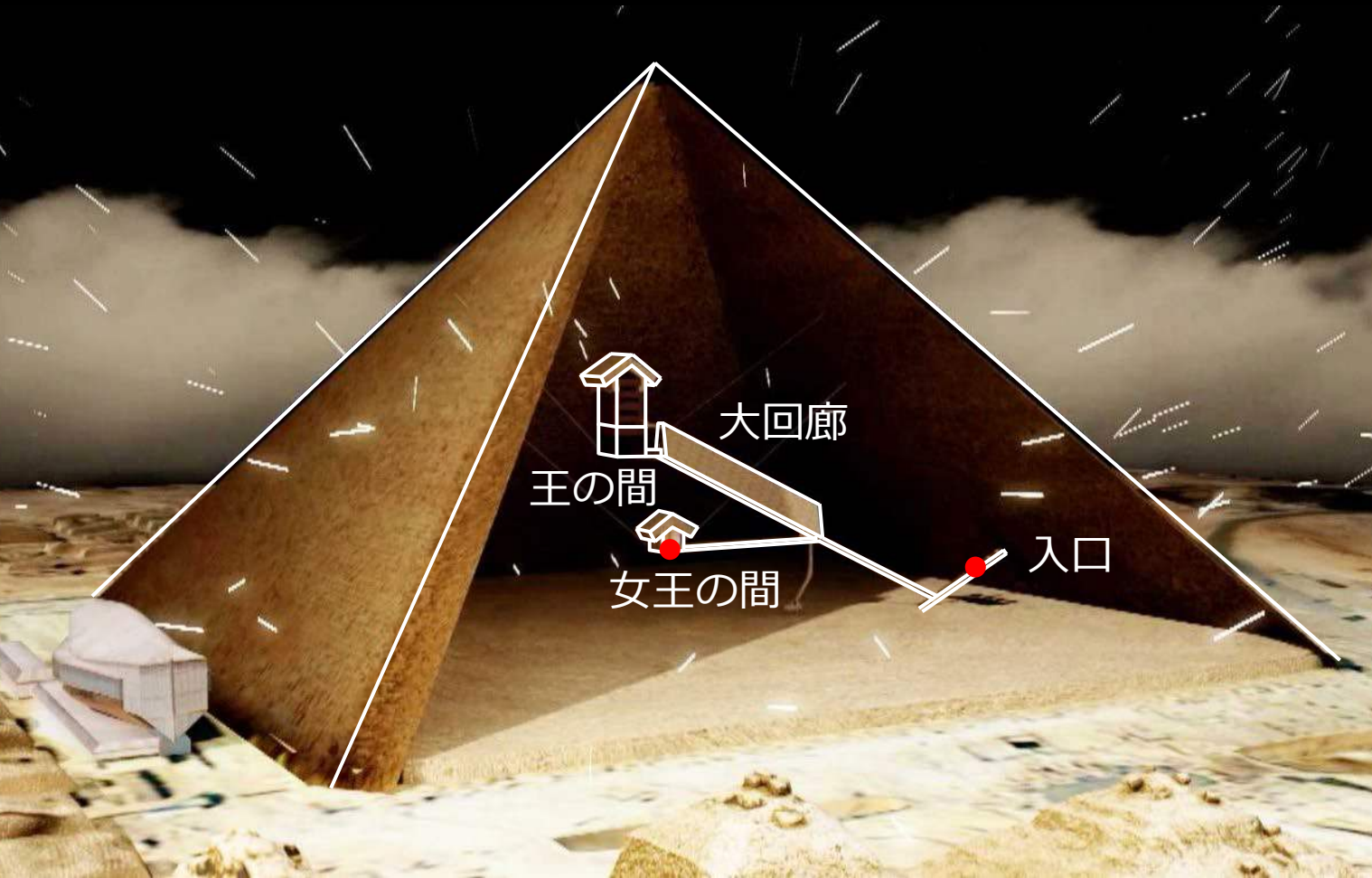
ScanPyramids (2015年～)

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、ドイツなど

参加研究機関：名古屋大学、KEK、CEA

ピラミッド内部の 未知構造の探査



異分野融合国際共同研究



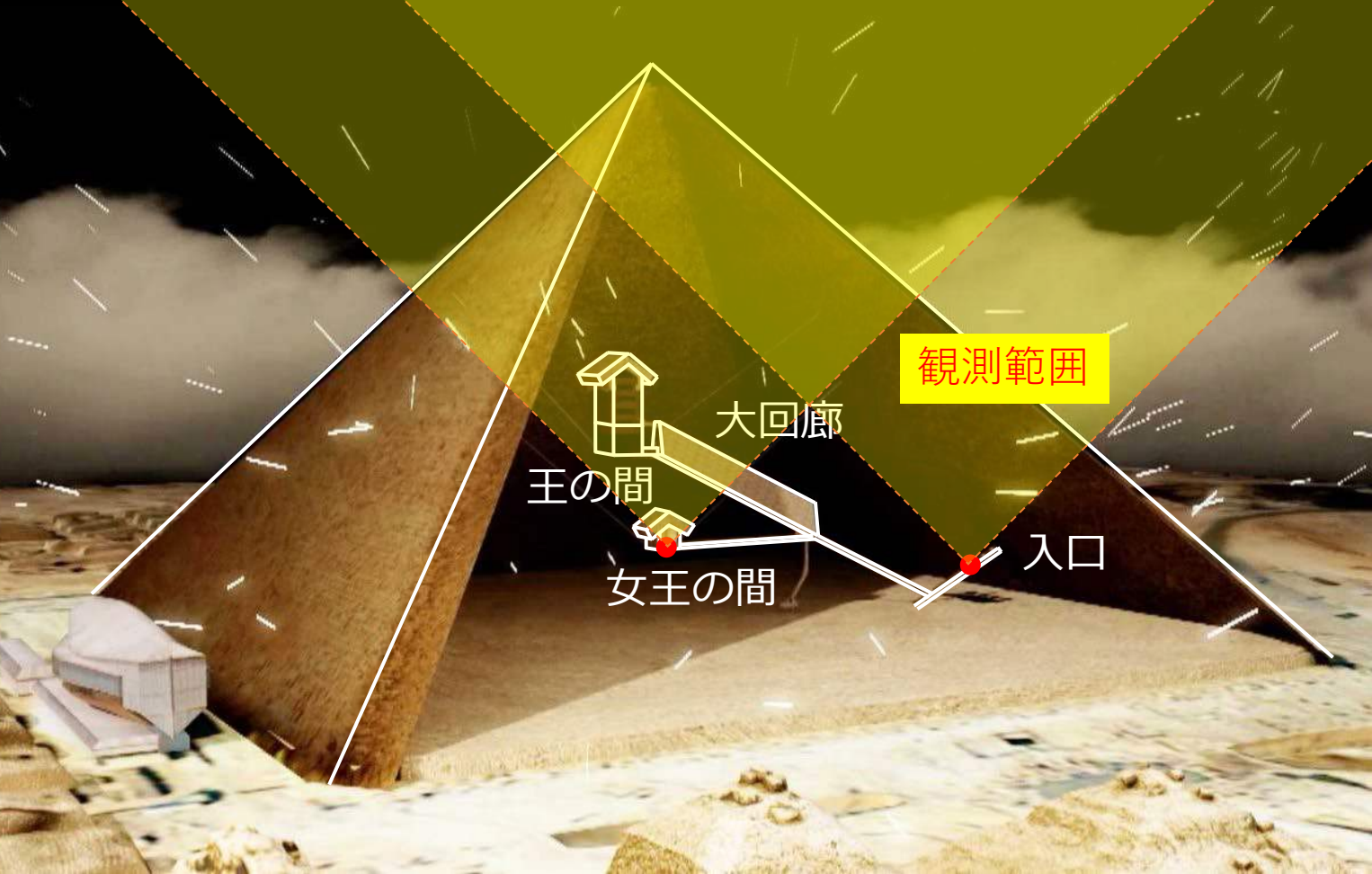
ScanPyramids (2015年～)

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、ドイツなど

参加研究機関：名古屋大学、KEK、CEA

ピラミッド内部の 未知構造の探査



異分野融合国際共同研究

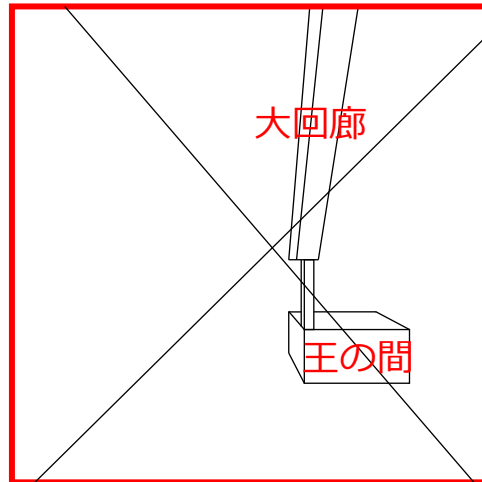


ピラミッドの宇宙線イメージング

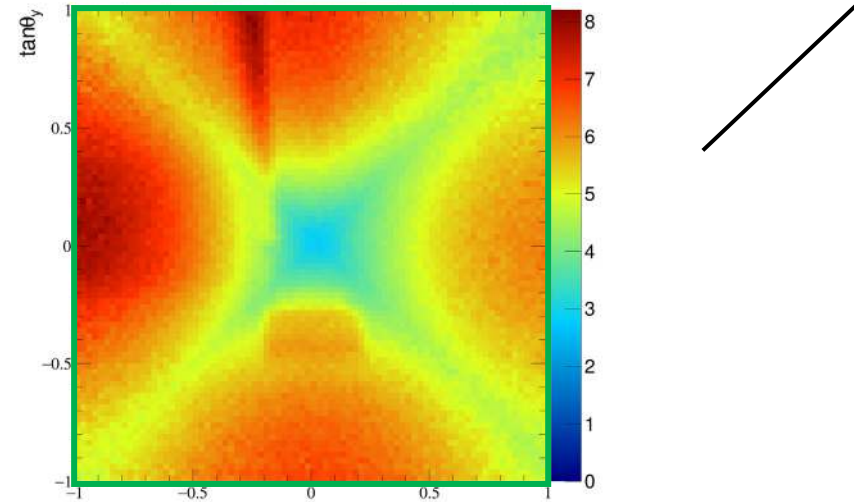
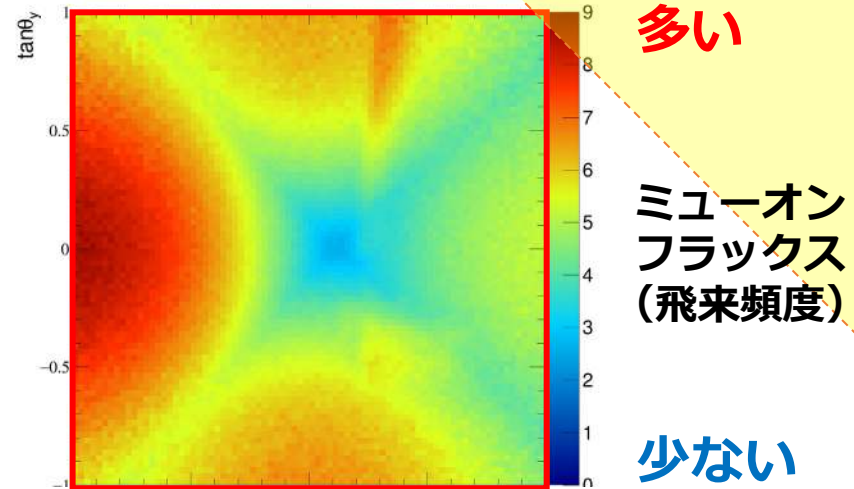
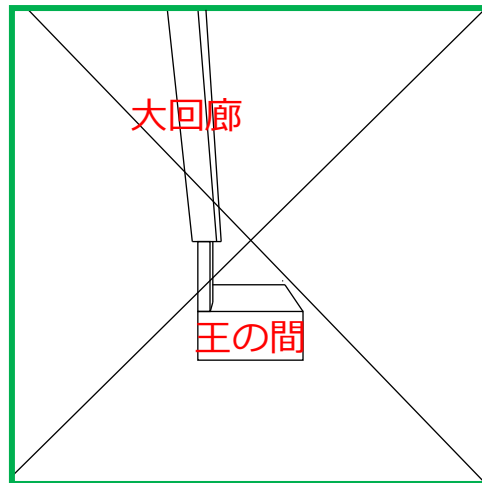
シミュレーション
(予想)

透視図

東側



西側



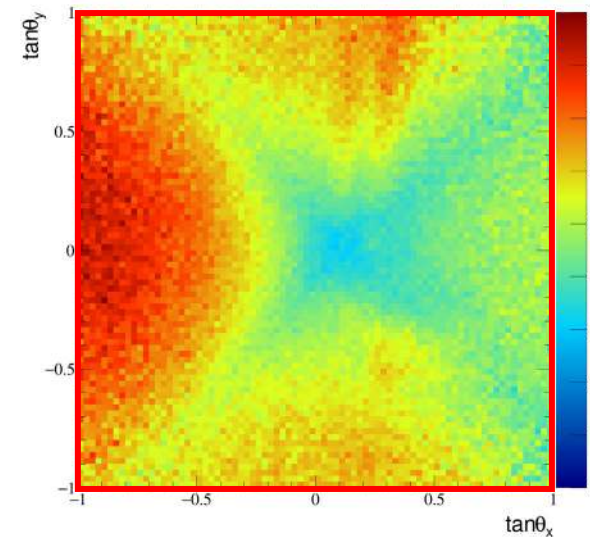
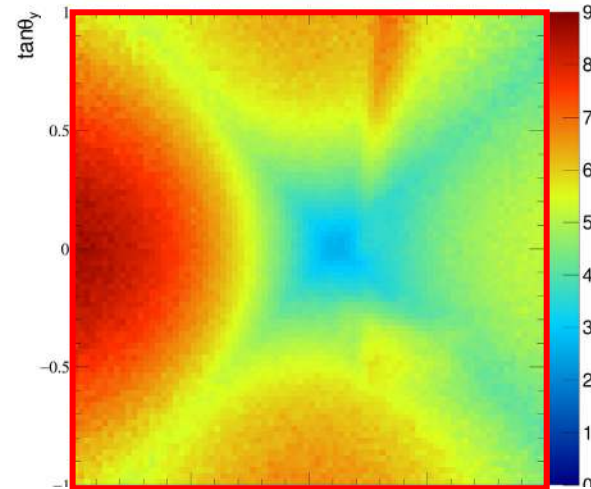
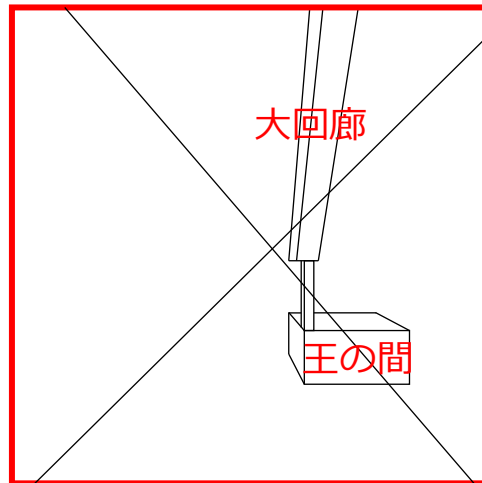
ピラミッドの宇宙線イメージング

シミュレーション
(予想)

データ
(結果)

透視図

東側

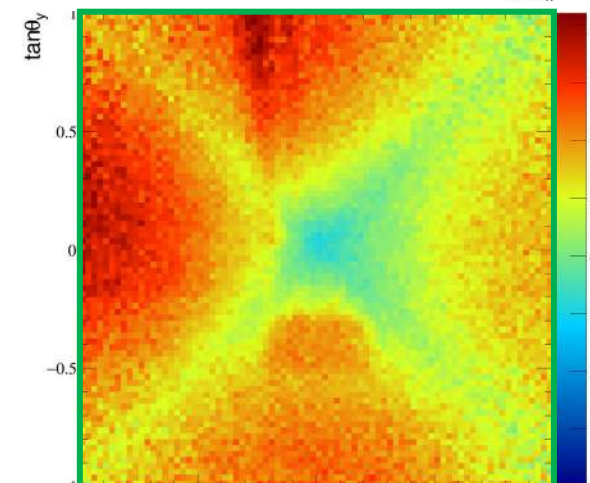
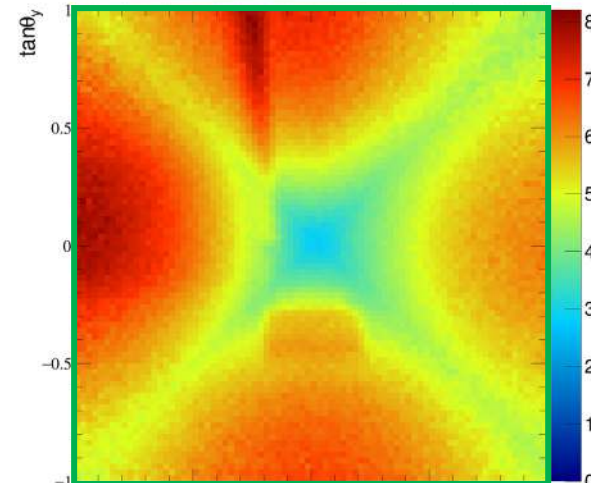
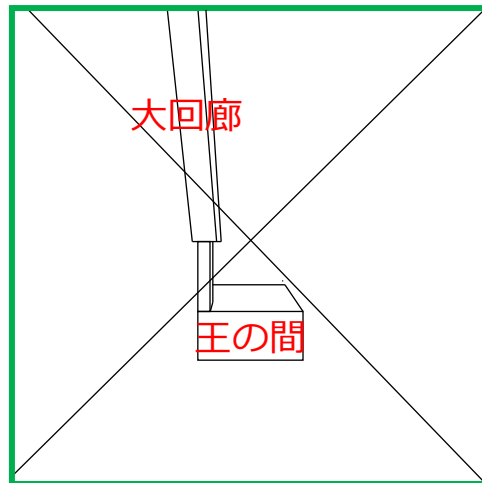


多い

ミュオン
フラックス
(飛来頻度)

少ない

西側



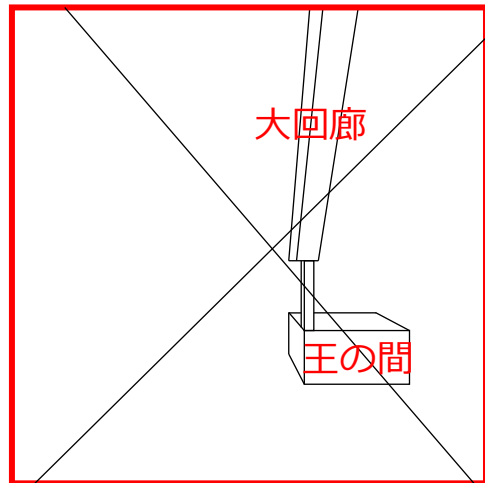
ピラミッドの宇宙線イメージング

シミュレーション
(予想)

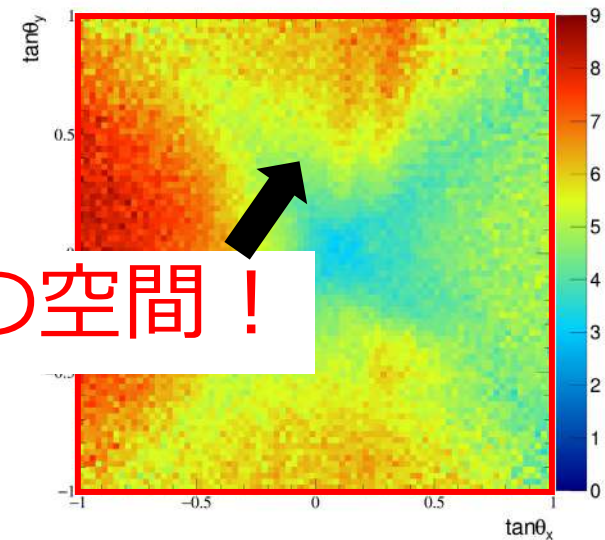
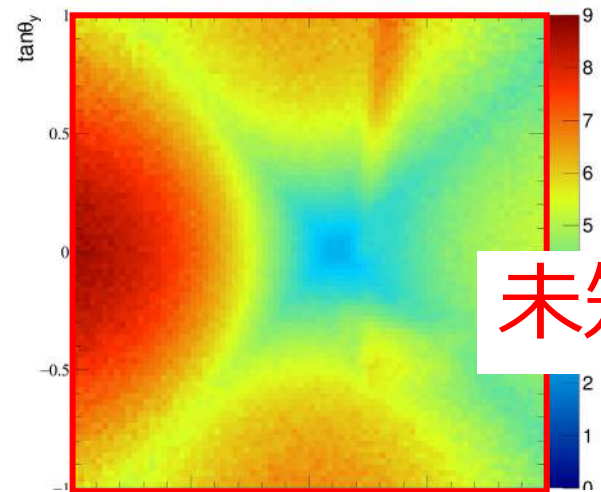
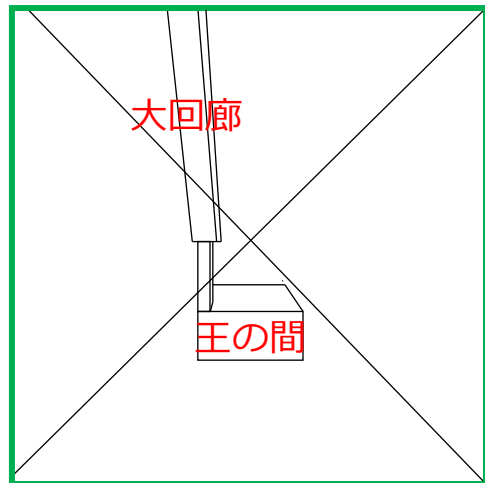
データ
(結果)

透視図

東側



西側

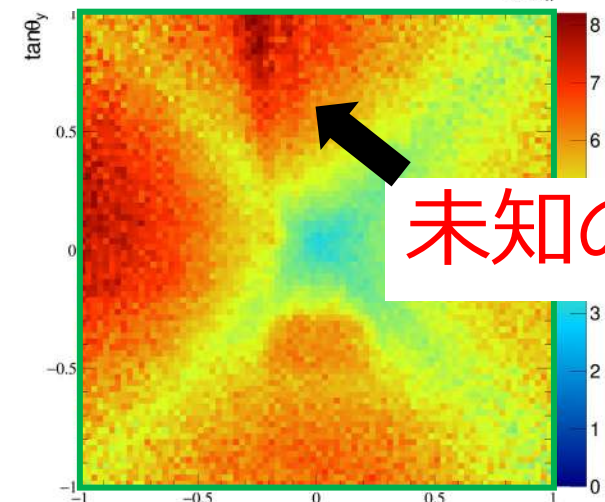
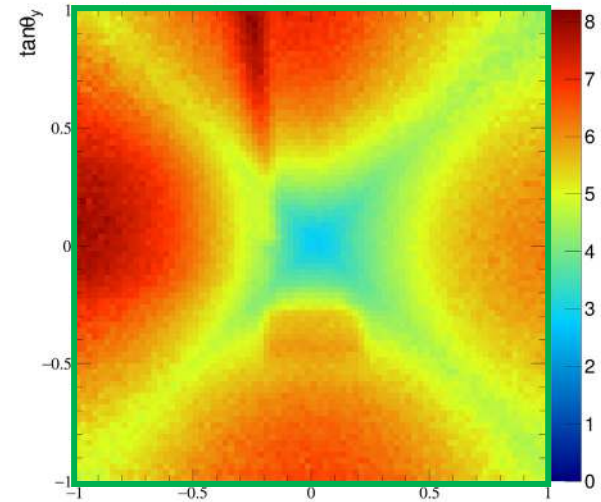


未知の空間！

多い

ミュオン
フラックス
(飛来頻度)

少ない



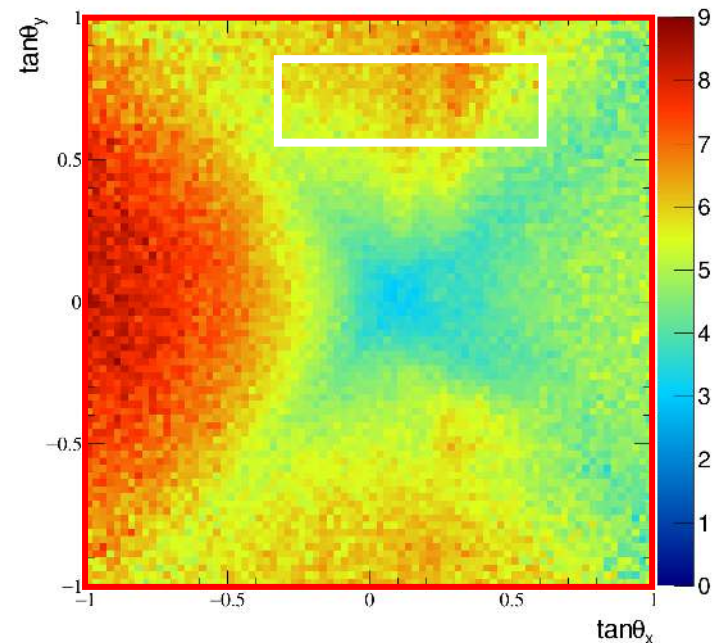
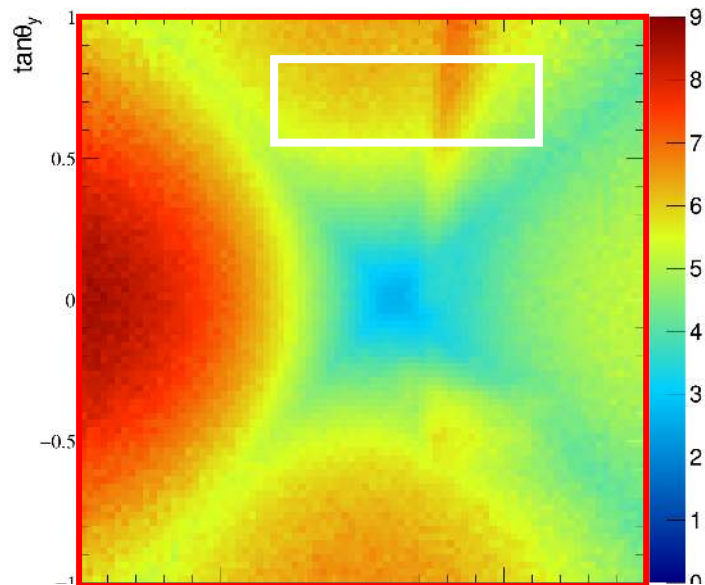
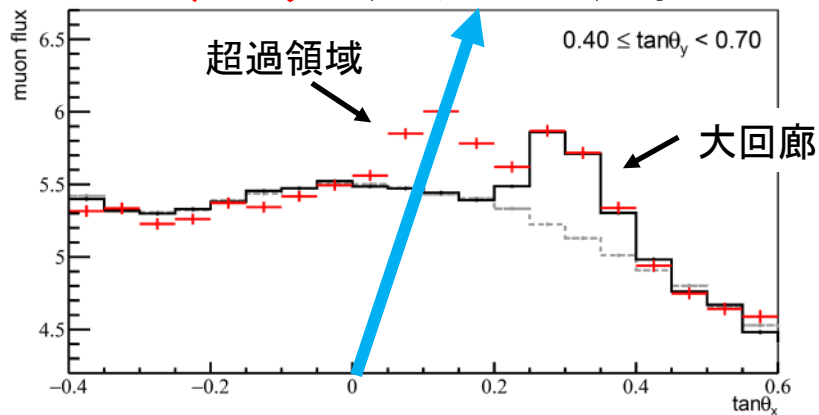
未知の空間！

シミュレーション(1000日相当)

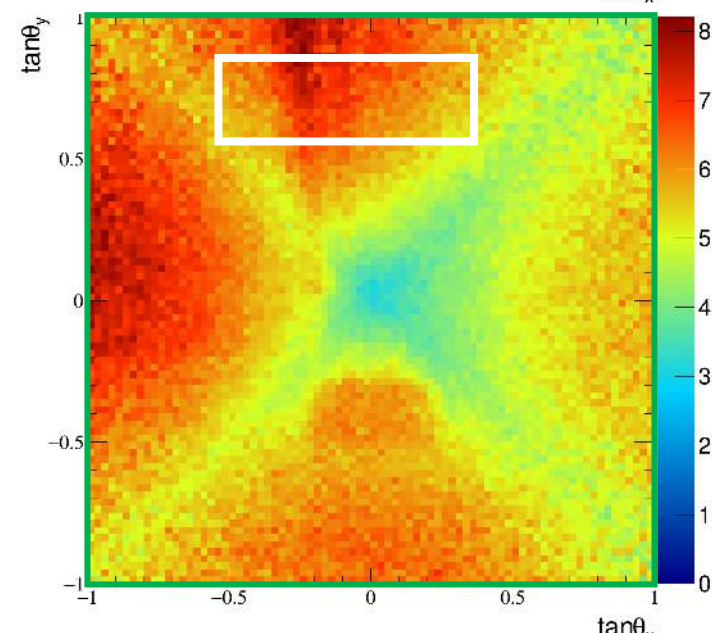
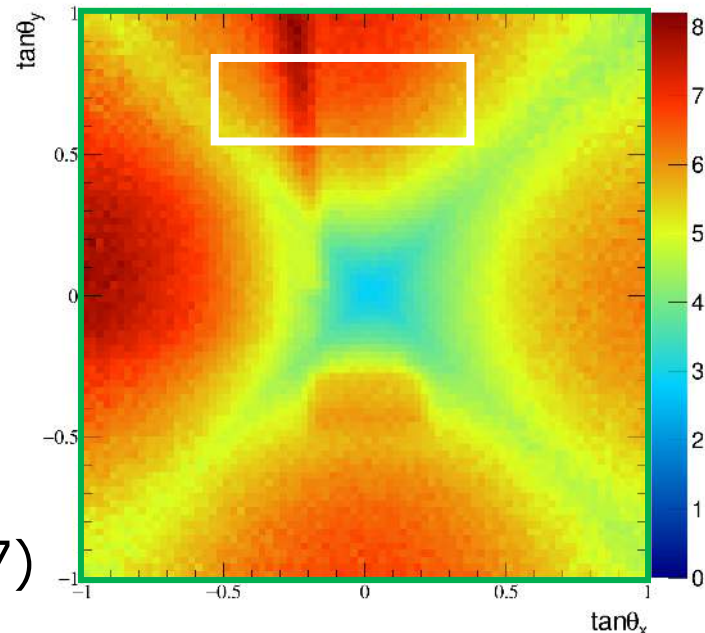
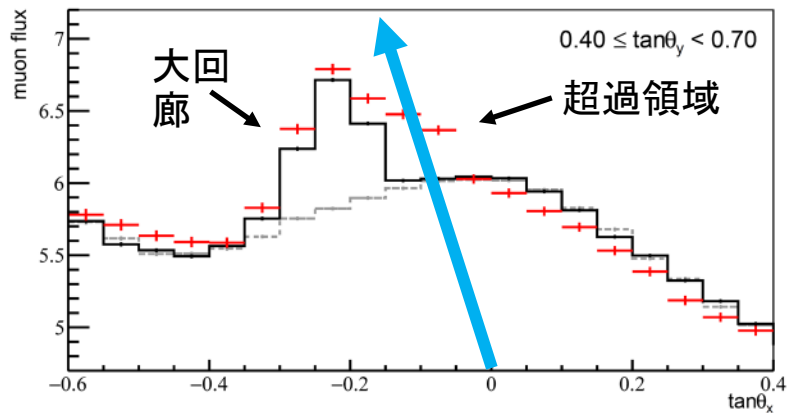
データ(150日)

X軸断面のヒストグラム

データとシミュレーション



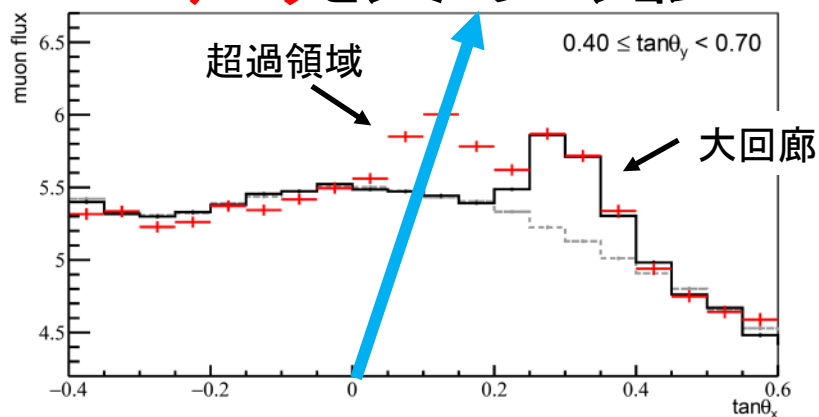
データとシミュレーション



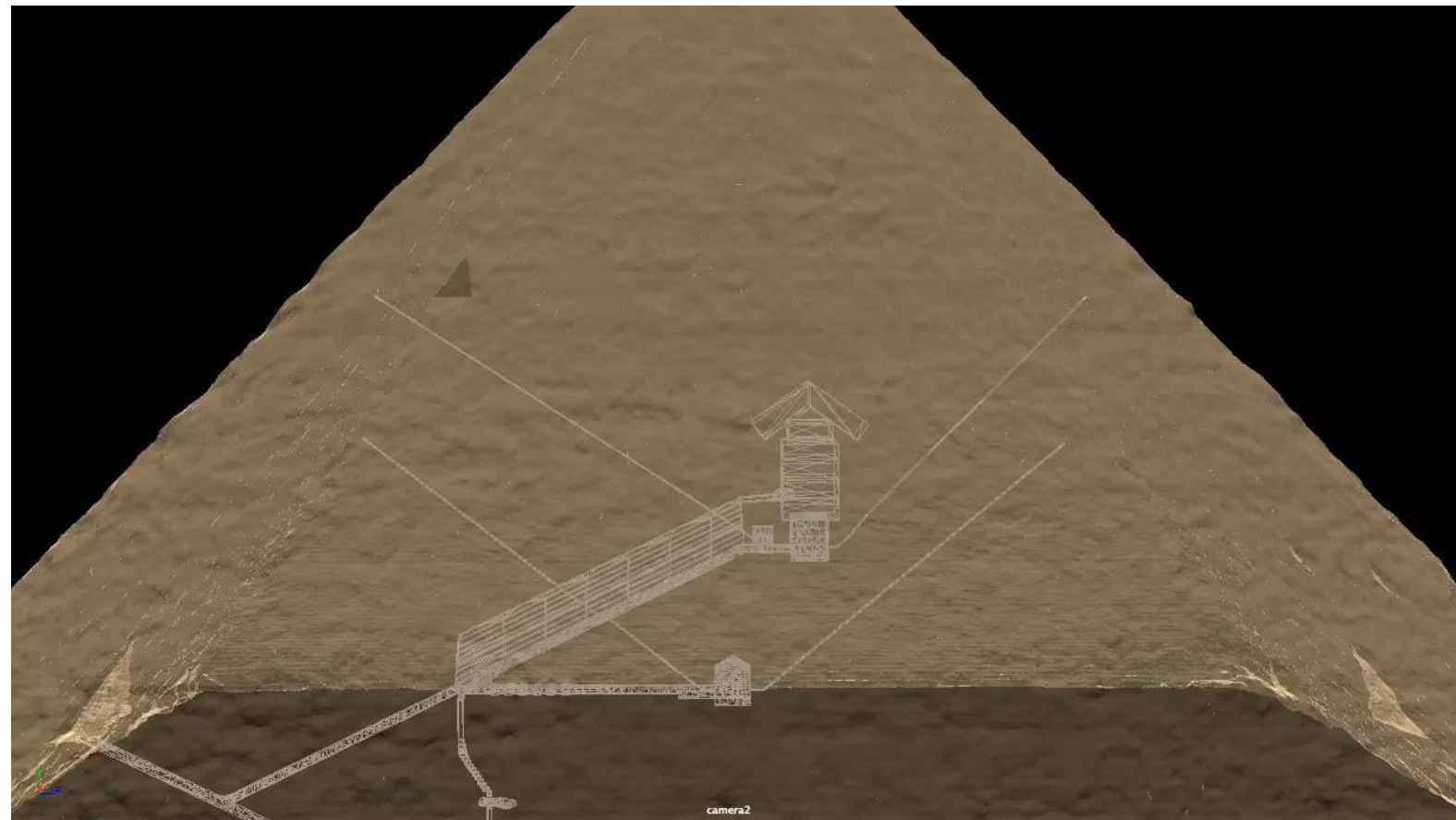
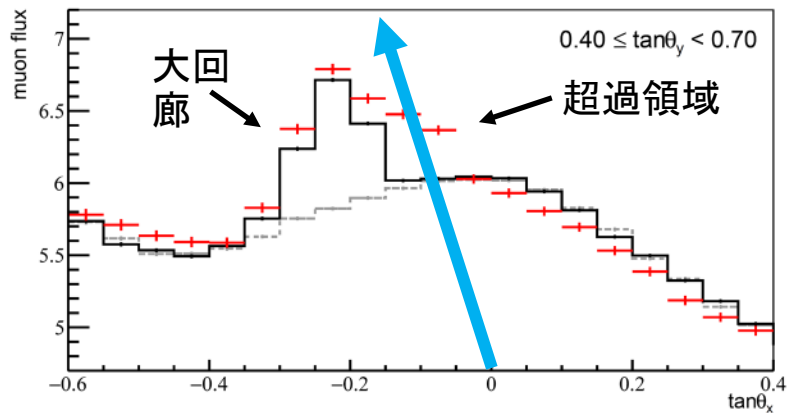
ヒストグラム

新空間の三次元位置の推定

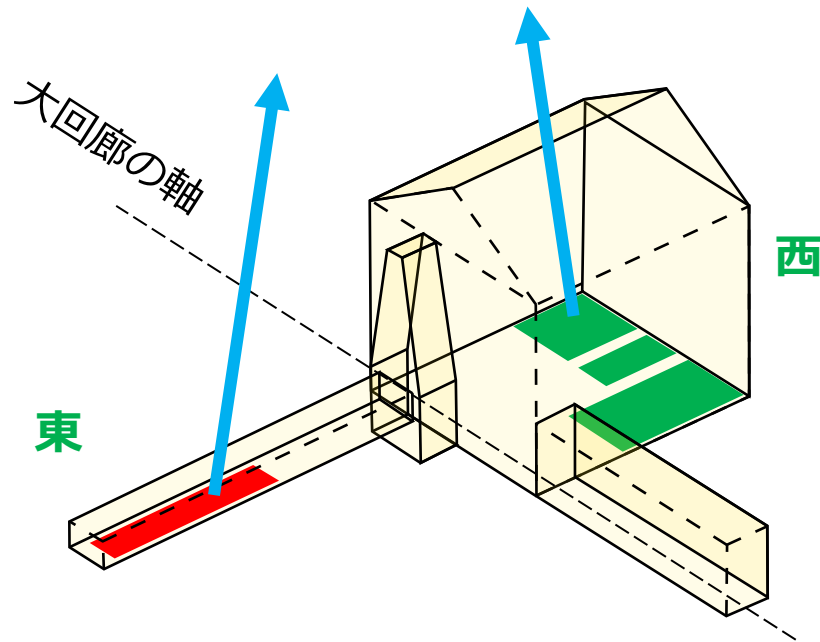
データとシミュレーション



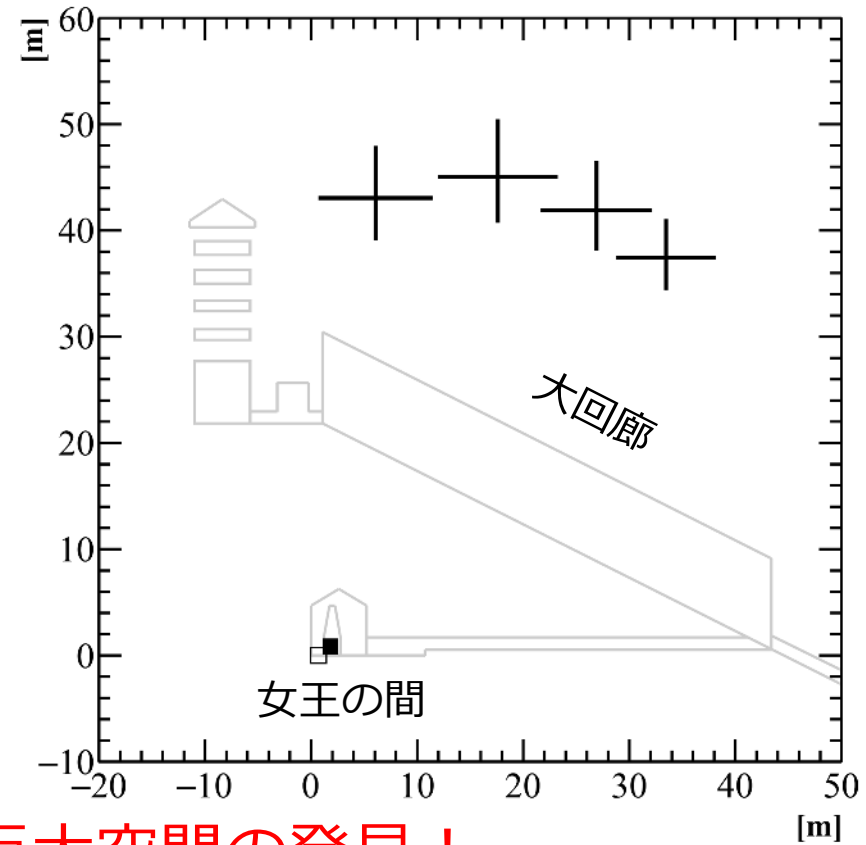
データとシミュレーション



解析の結果



三角測量により求めた空間の位置 (+)



ピラミッド内部の巨大空間の発見！

- ・ 断面積は大回廊に匹敵
- ・ 長さ：30m以上
- ・ 位置：女王の間から40m上方

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

クフ王のピラミッド内部の新空間の発見！（2017）

nature > letters > article

nature
International journal of science

Letter | Published: 02 November 2017

Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons

Kunihiro Morishima , Mitsuaki Kuno, Akira Nishio, Nobuko Kitagawa, Yuta Manabe, Masaki Moto, Fumihiko Takasaki, Hirofumi Fujii, Kotaro Satoh, Hideyo Kodama, Kohei Hayashi, Shigeru Odaka, Sébastien Procureur, David Attié, Simon Bouteille, Denis Calvet, Christopher Filosa, Patrick Magnier, Irakli Mandjavidze, Marc Riallot, Benoit Marini, Pierre Gable, Yoshikatsu Date, Makiko Sugiura, Yasser Elshayeb, Tamer Elnady, Mustapha Ezzy, Emmanuel Guerriero, Vincent Steiger, Nicolas Serikoff, Jean-Baptiste Mouret, Bernard Charlès, Hany Helal & Mehdi Tayoubi  - Show fewer authors

Nature **552**, 386–390 (21 December 2017) | [Download Citation](#)

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



通路状の空間に狙いを定めた
多地点イメージング（2019年）

切妻構造

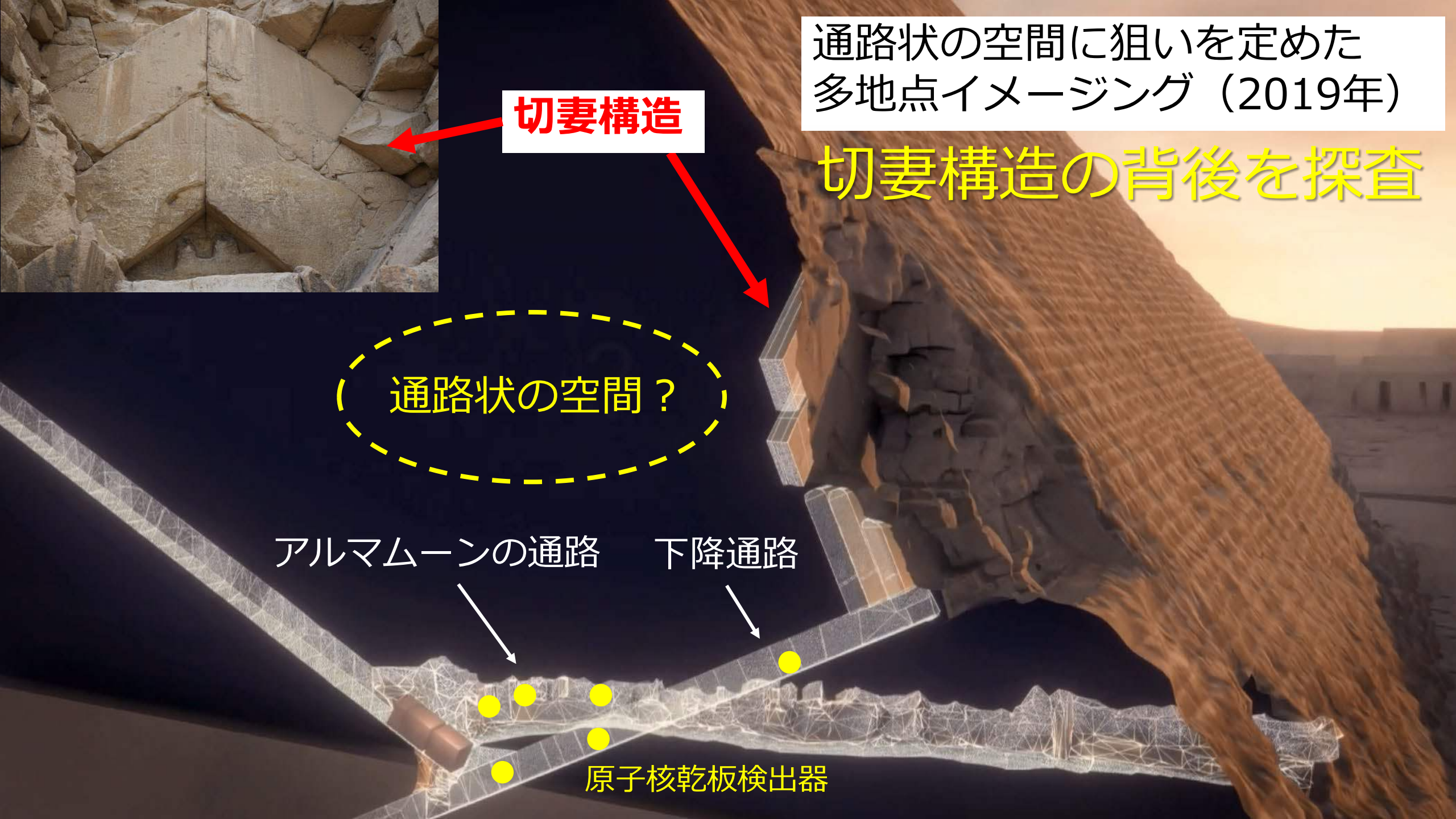
切妻構造の背後を探查

通路状の空間？

アルマムーンの通路

下降通路

原子核乾板検出器



通路状の空間に狙いを定めた
多地点イメージング（2019年）

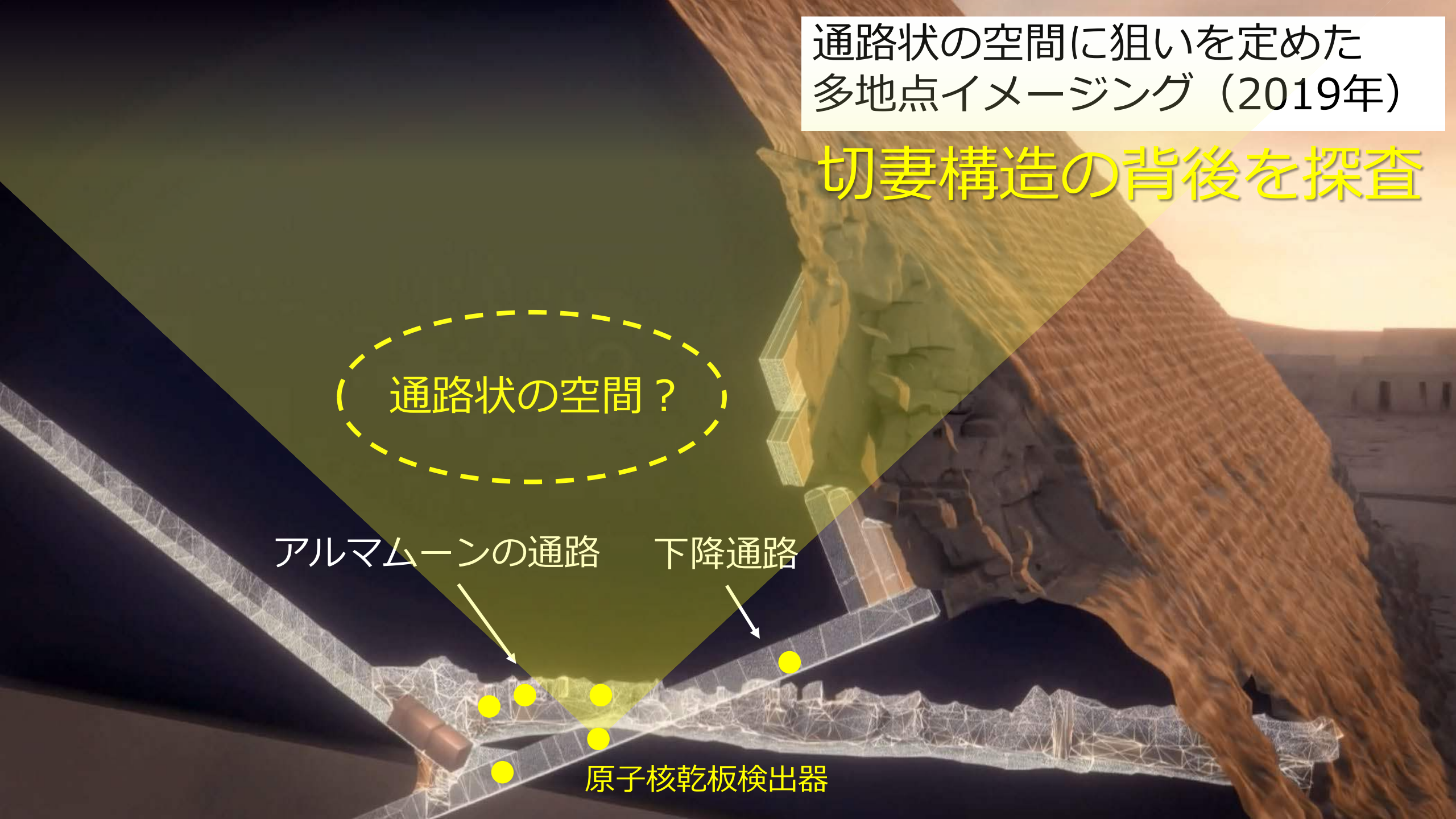
切妻構造の背後を探查

通路状の空間？

アルマムーンの通路

下降通路

原子核乾板検出器



通路状の空間に狙いを定めた
多地点イメージング（2019年）

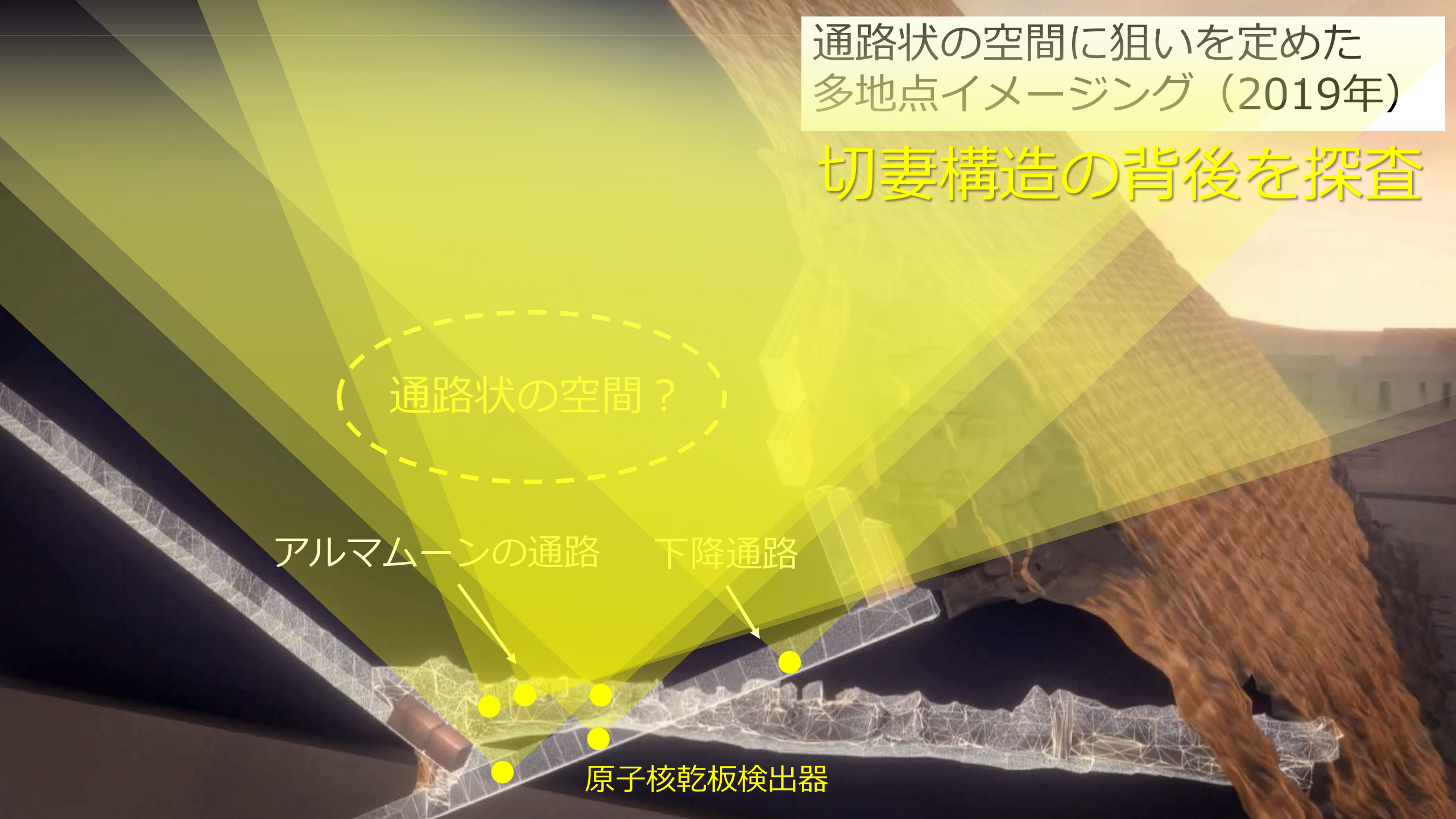
切妻構造の背後を探查

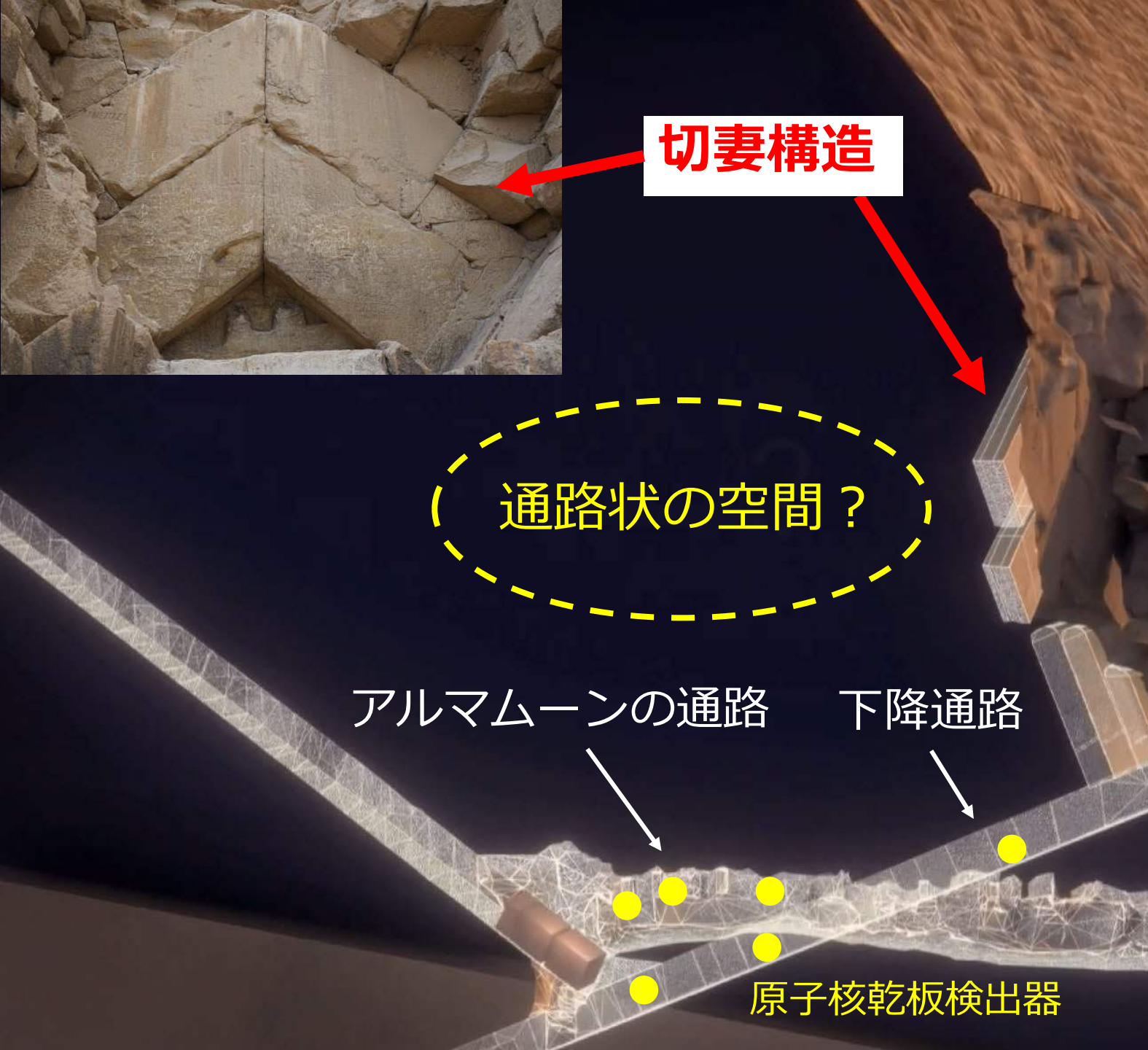
通路状の空間？

アルマムーンの通路

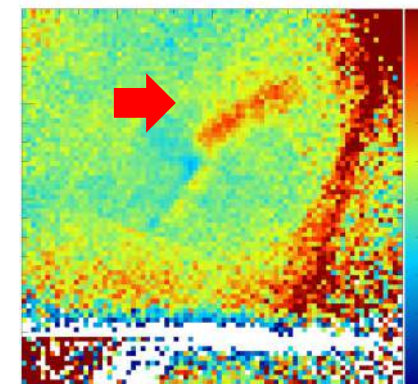
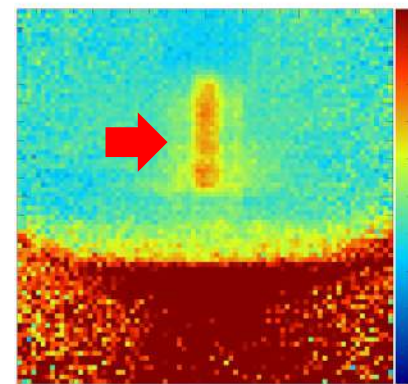
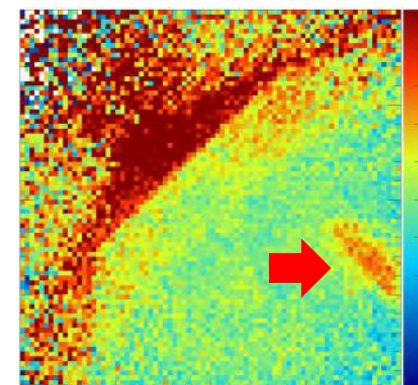
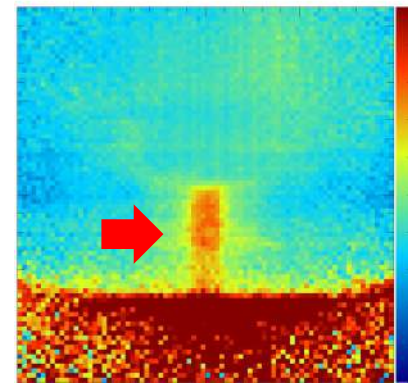
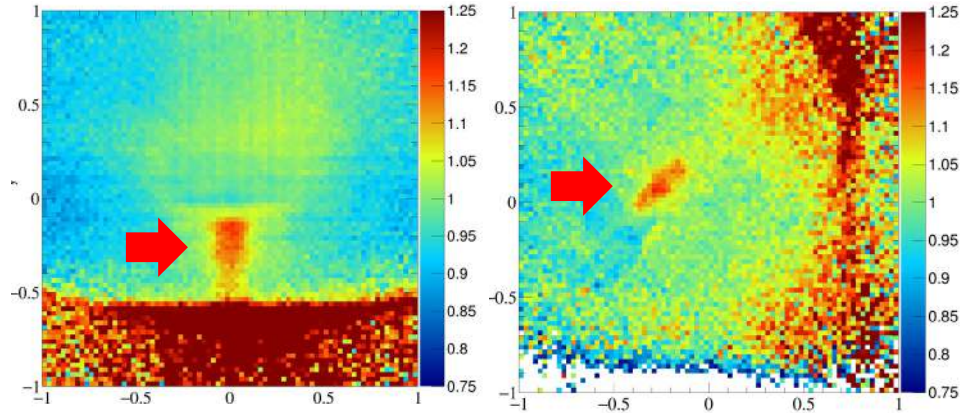
下降通路

原子核乾板検出器

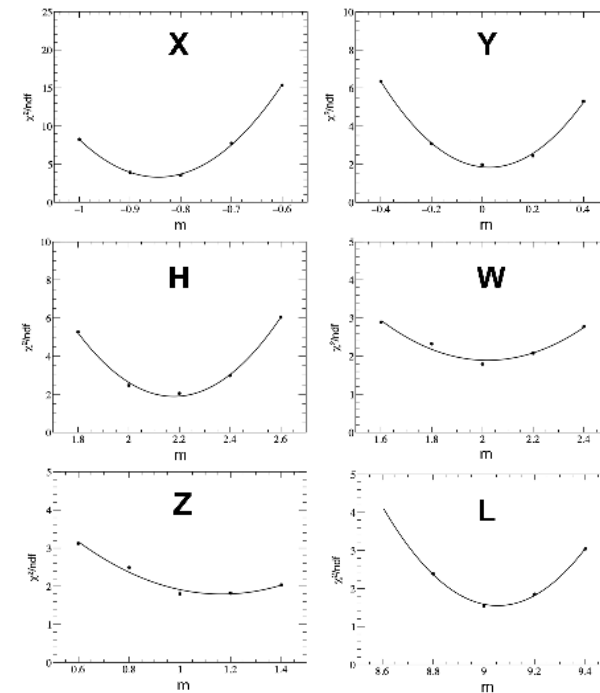
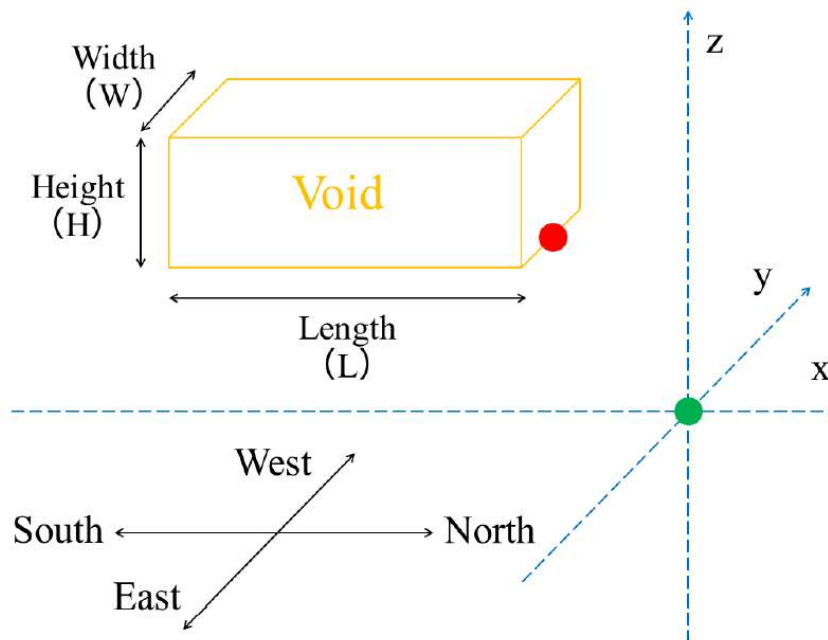
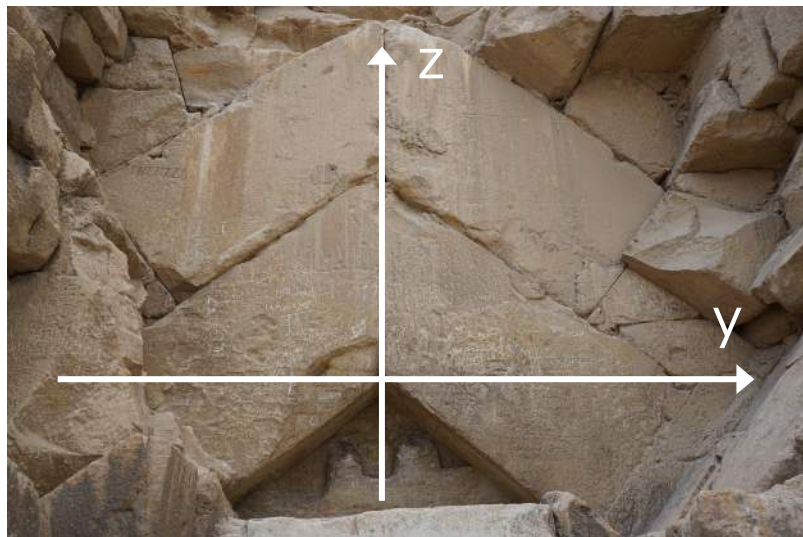




観測結果



新空間の形状解析の結果

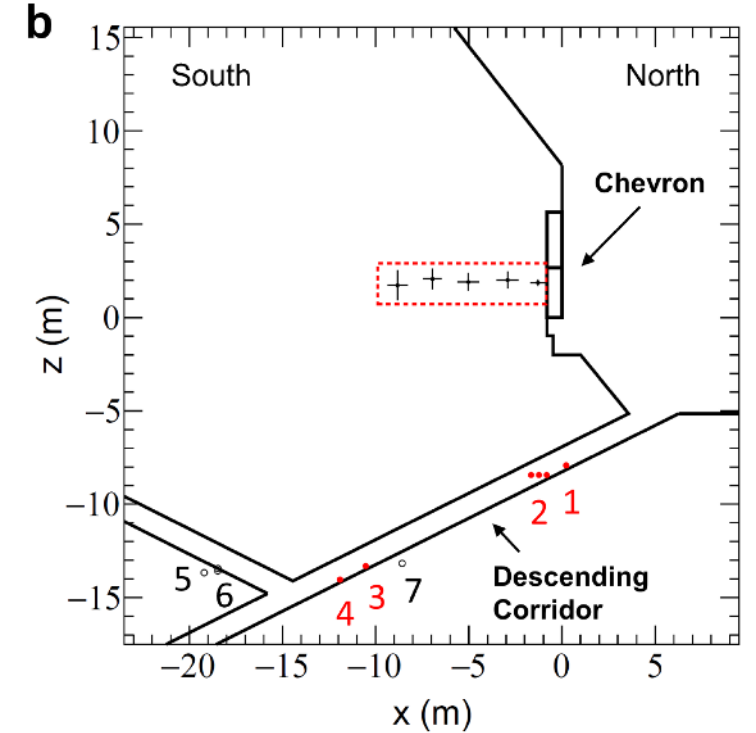
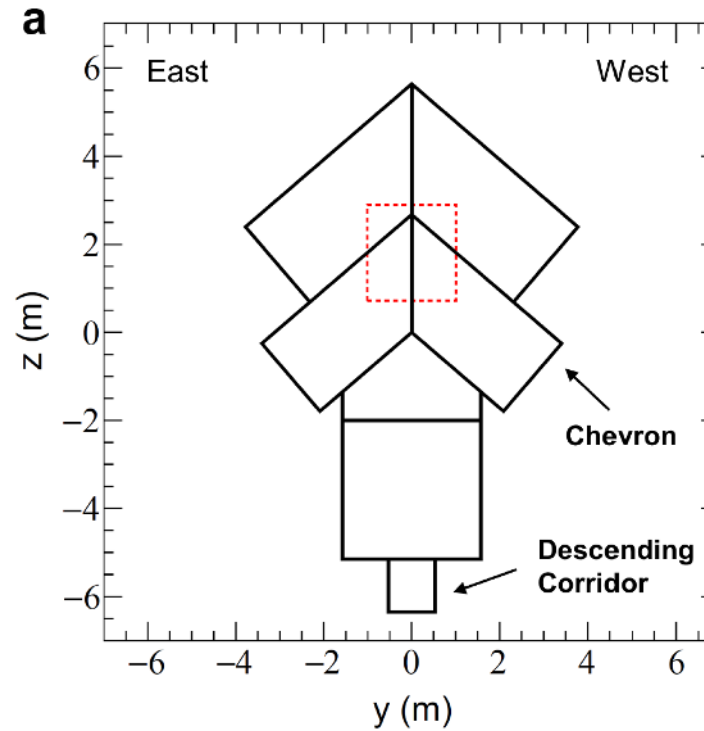
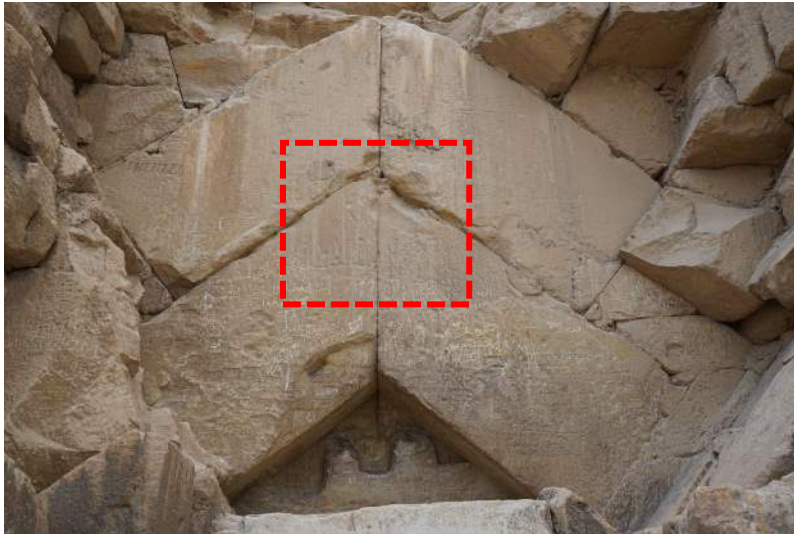


Parameter	Nagoya estimate
width W (m)	2.02 ± 0.06
height H (m)	2.18 ± 0.17
length L (m)	9.06 ± 0.07
North-South X (m)	0.84 ± 0.05
East-West Y (m)	0.03 ± 0.04
altitude Z (m)	0.72 ± 0.13
slope α ($^\circ$)	-0.3 ± 1.5

- 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

新空間の形状推定結果



形状：2.02m (幅) x 2.18m (高さ) x 9.06m (長さ)

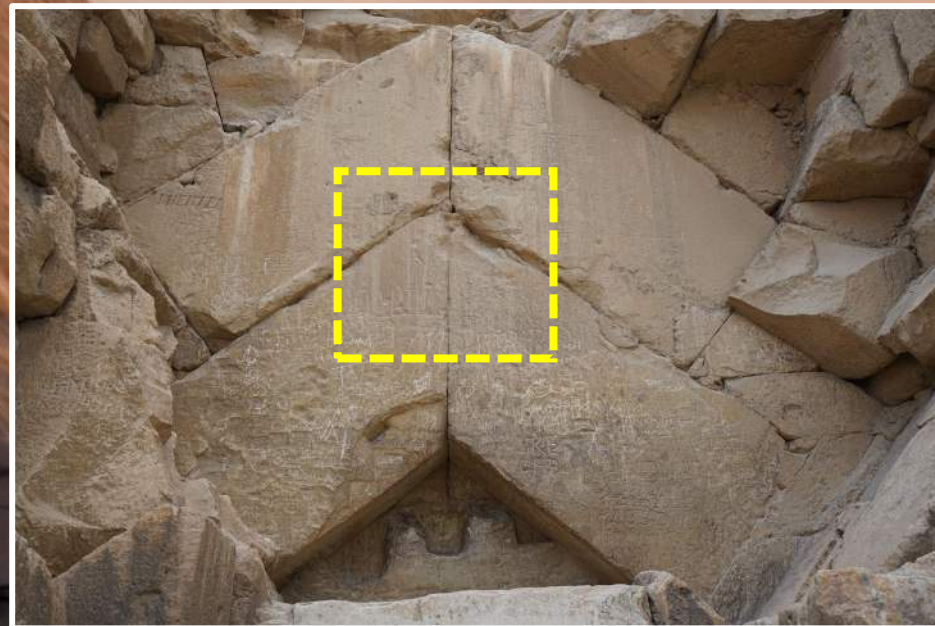
位置：切妻構造の表面から80cm奥に空間が存在（切妻構造の板の厚さと一致！）

多地点イメージングの解析結果（2023年）

形状：約2m x 約2m x 約9m（長さ）

位置：切妻構造の表面から80cm奥から始まる！

→ 切妻構造の板の厚さは80cm！

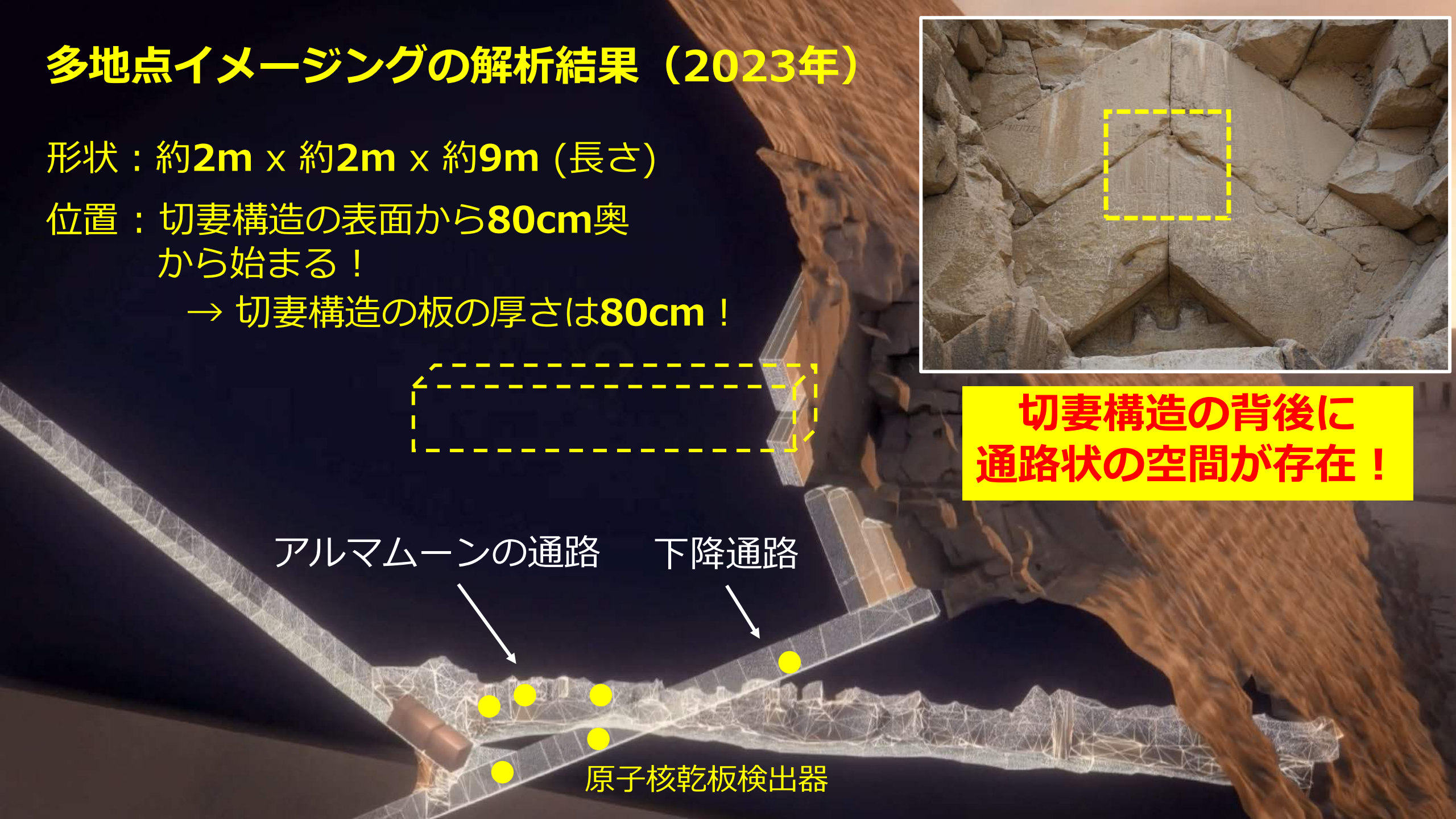


**切妻構造の背後に
通路状の空間が存在！**

アルマムーンの通路

下降通路

原子核乾板検出器



地中レーダーによる確認

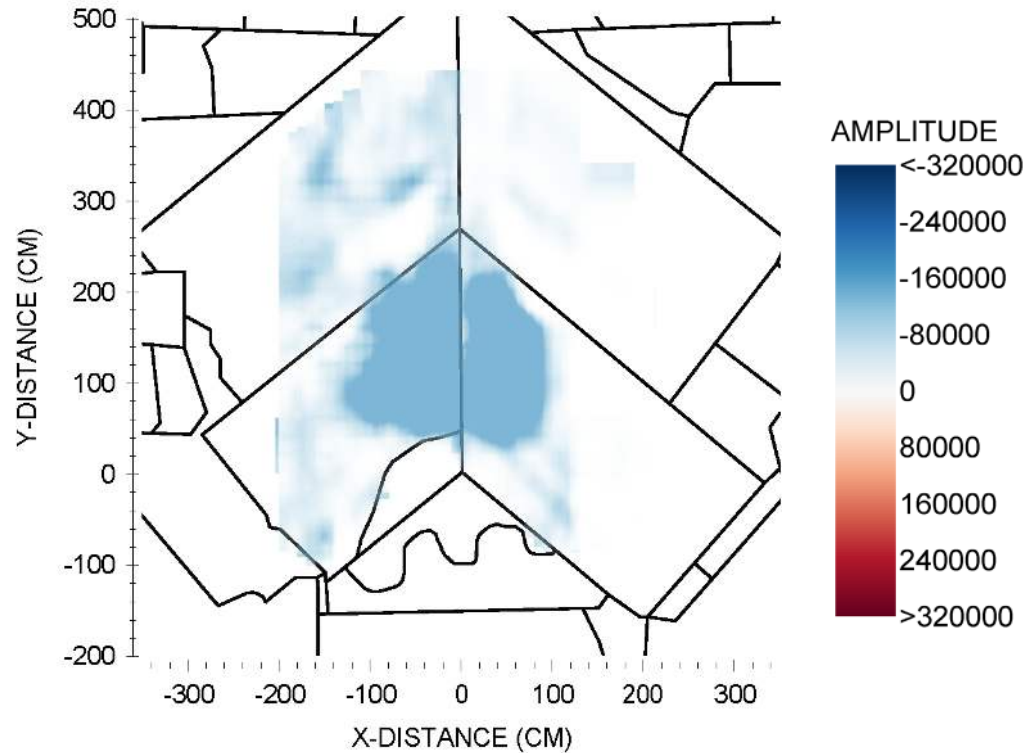


©ScanPyramids

- 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

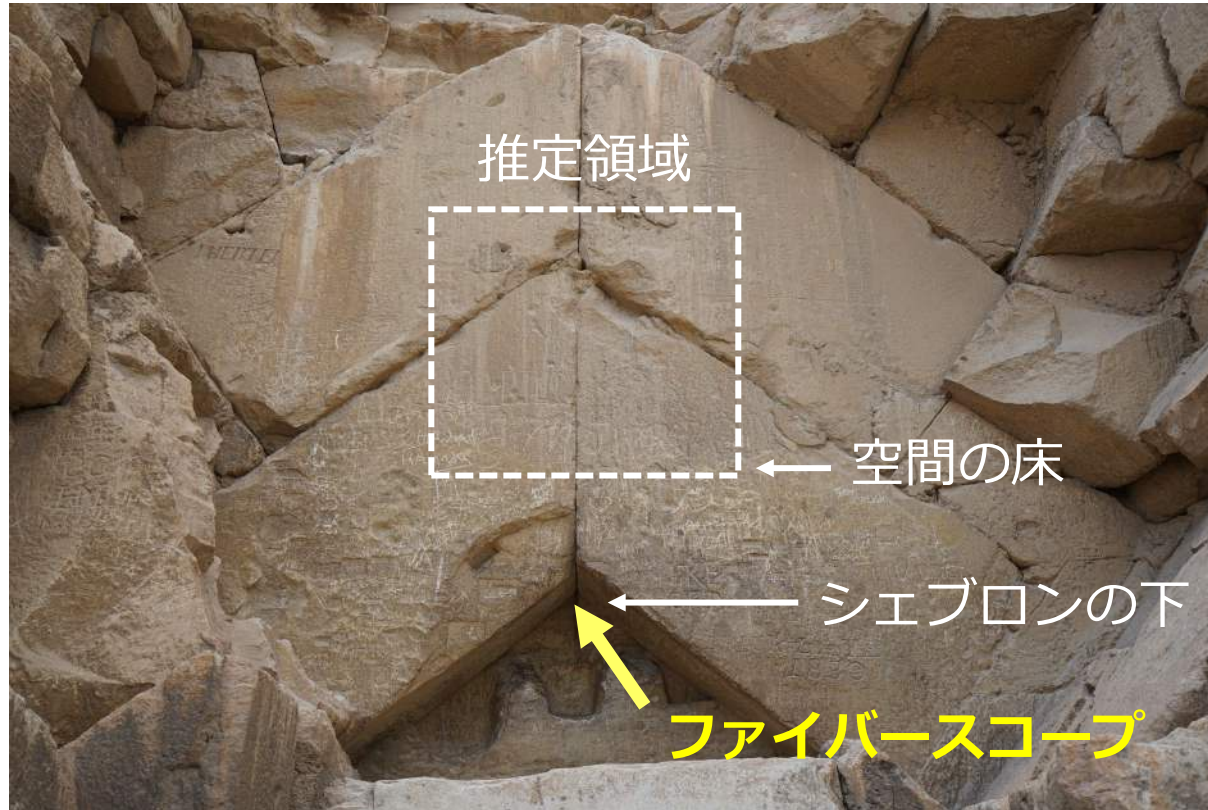
地中レーダーによる確認

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

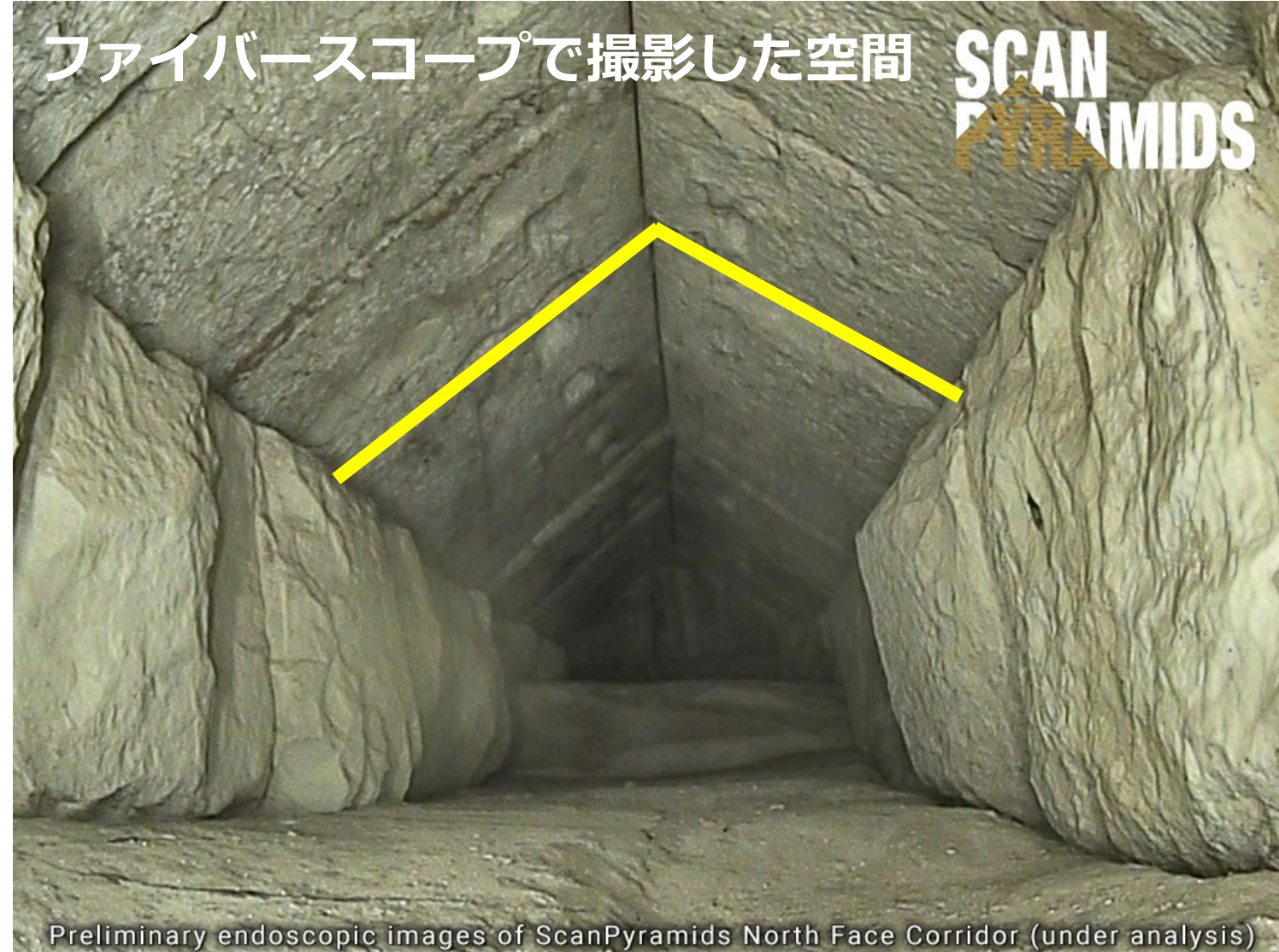


切妻構造とその背後の石組みの隙間を利用してファイバースコープを挿入

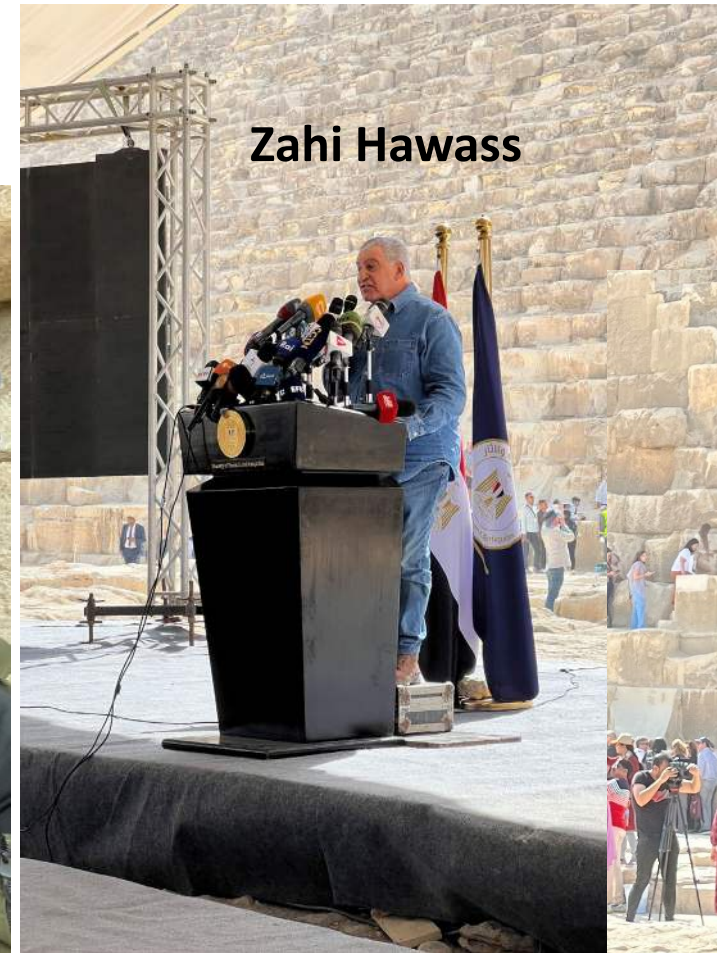
ScanPyramids North Face Corridor



- 宇宙線ミュオン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
- 新しい考古遺跡調査の手法の開拓



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・ハワス博士「今世紀最大の発見！」
- 宇宙線ミュオンを利用した学際研究の1つの成功例

大回廊と地下の間からの観測

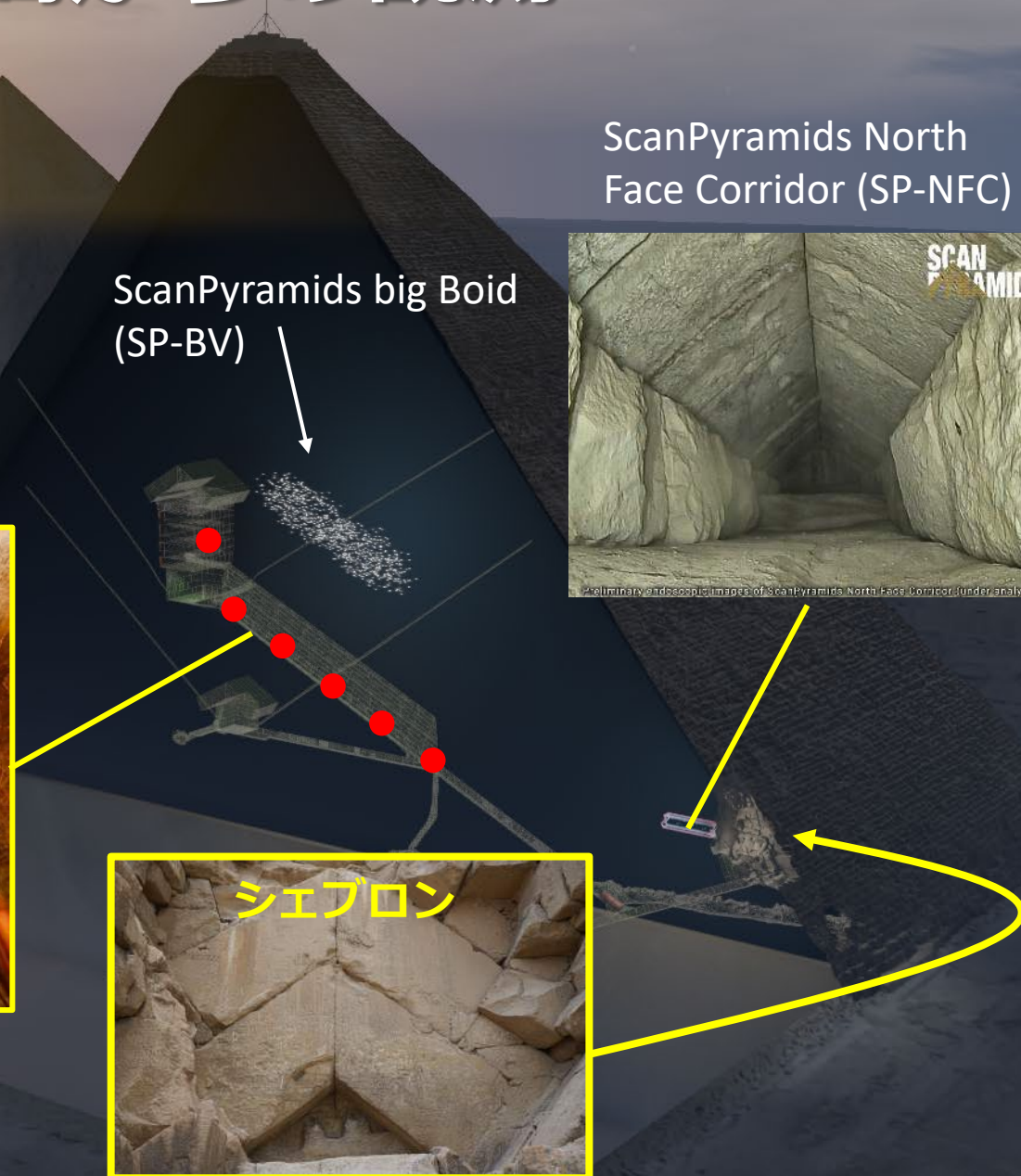
大回廊からの巨大空間の観測

- ・ 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)



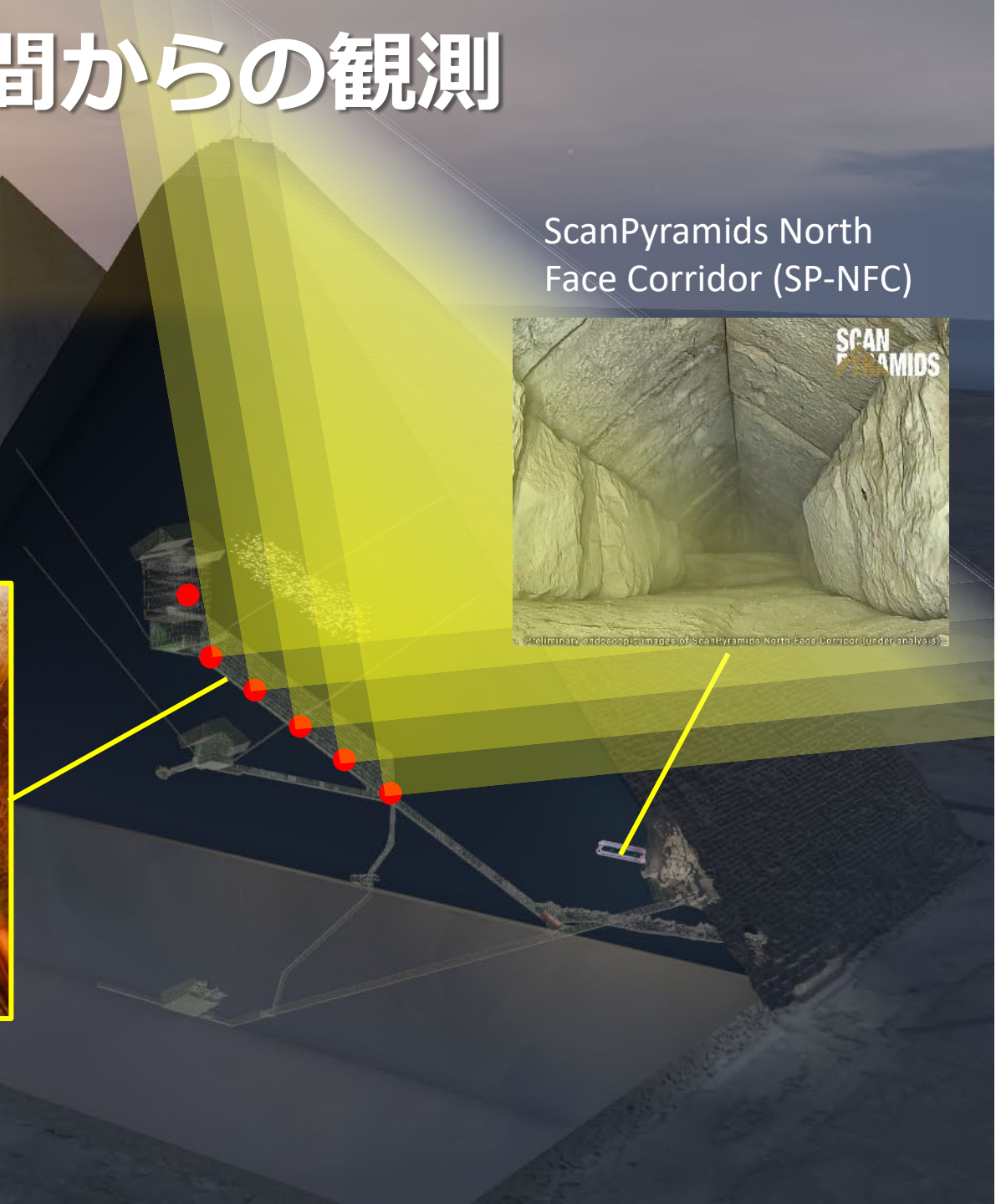
大回廊と地下の間からの観測

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 big Boid
(SP-BV)

ScanPyramids North
Face Corridor (SP-NFC)



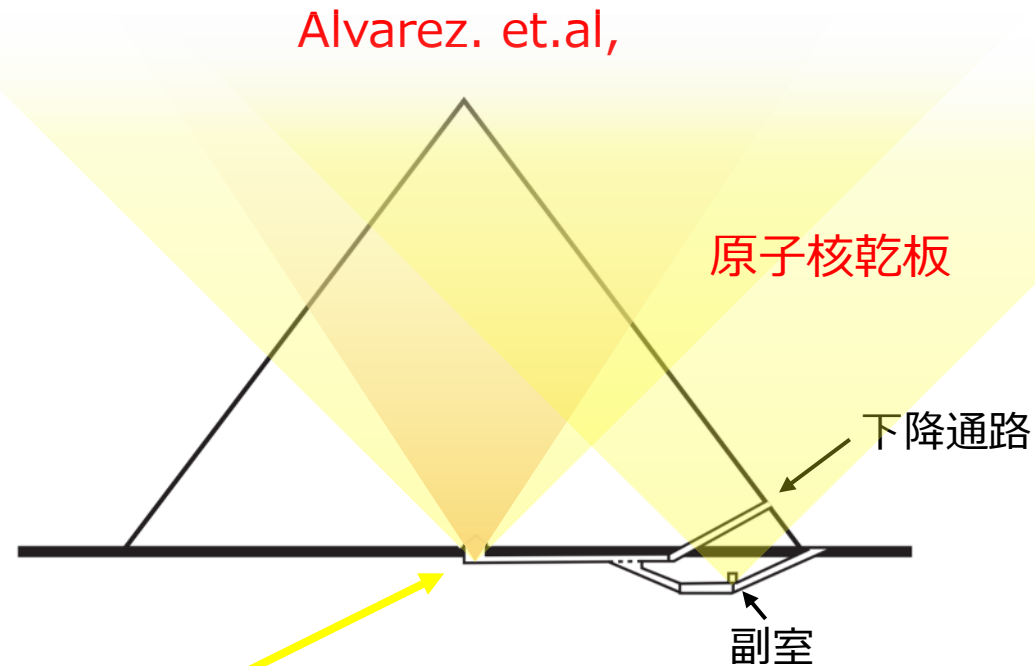
Ultimate endoscopic image of ScanPyramids North Face Corridor (under analysis)

カフラー王のピラミッド (2022年10月～)

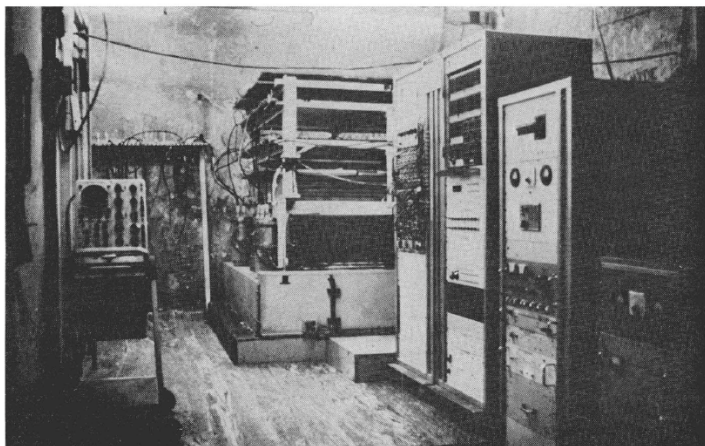


カフラー王のピラミッド

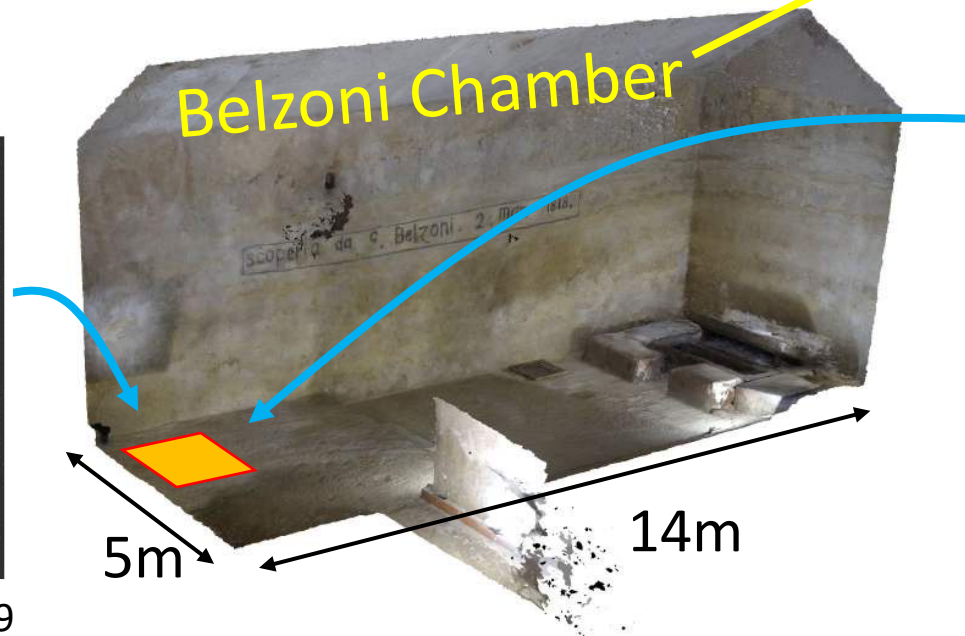
- ・ 原子核乾板を多地点かつ多方向に設置することで、**アルヴァレらが測定していない領域まで探査**
- ・ 初の**全方位可視化**
- ・ アルヴァレらが設置した位置に原子核乾板を設置することで、**結果の直接検証**



アルヴァレらのスパークチェンバー



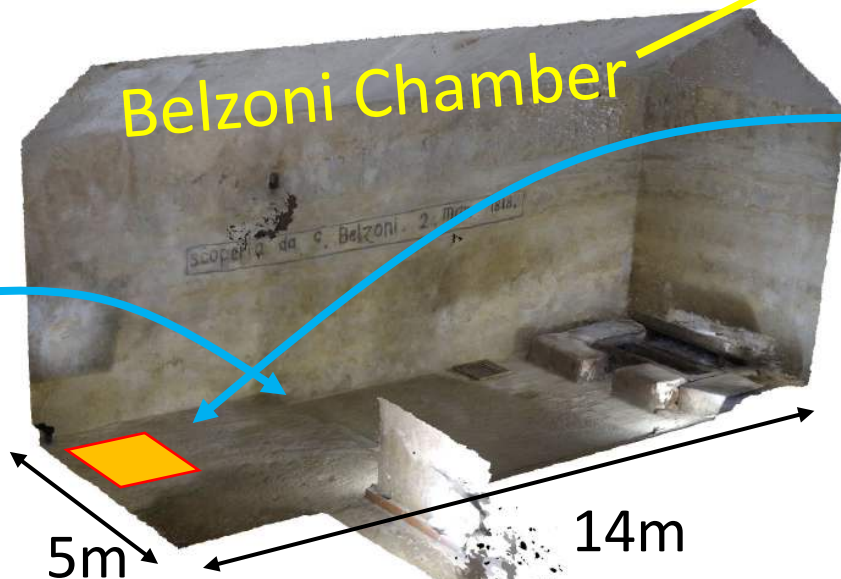
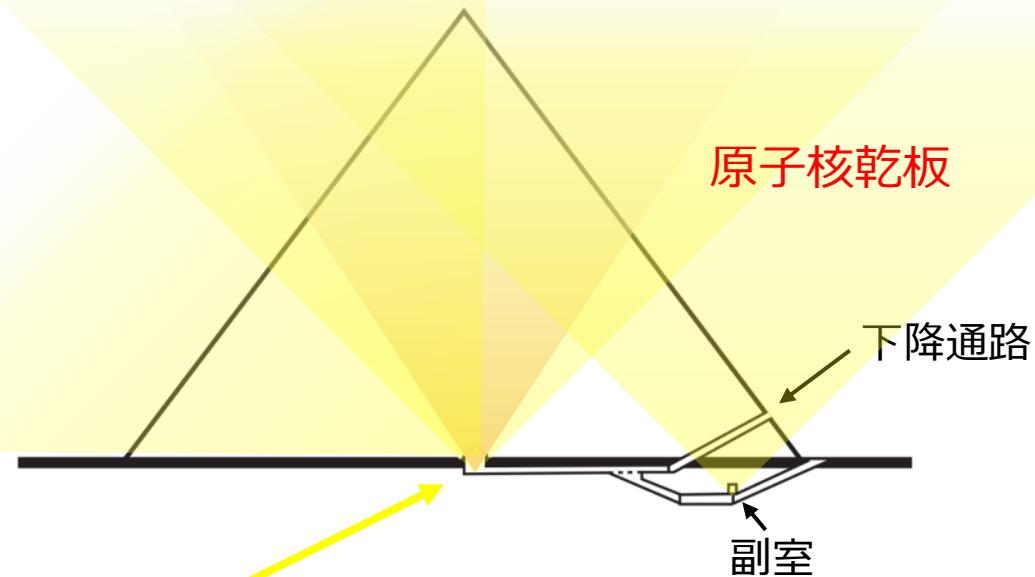
L. W. Alvarez, Science, 167, 3919, 832-839



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,



ギザの三大ピラミッドの観測

内部構造、密度分布、総重量を明らかにして、
ピラミッド建造方法の解明へ

カフラー王 (2022年～)

クフ王

メンカウラー王 (2023年～)



宇宙線イメージング考古学



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



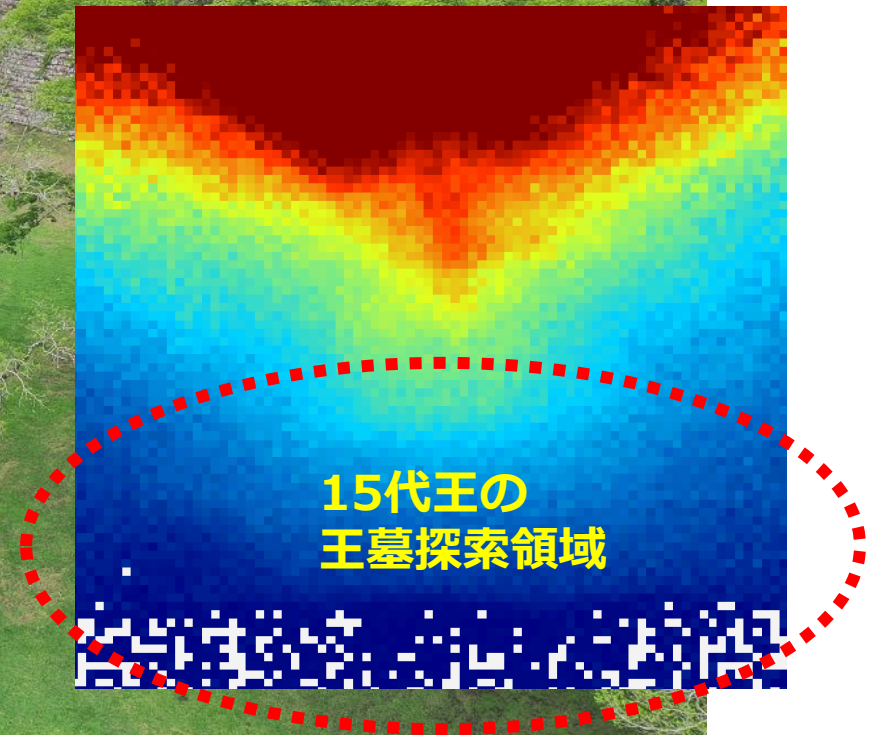
マヤ文明のコパン遺跡@ホンジュラス

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

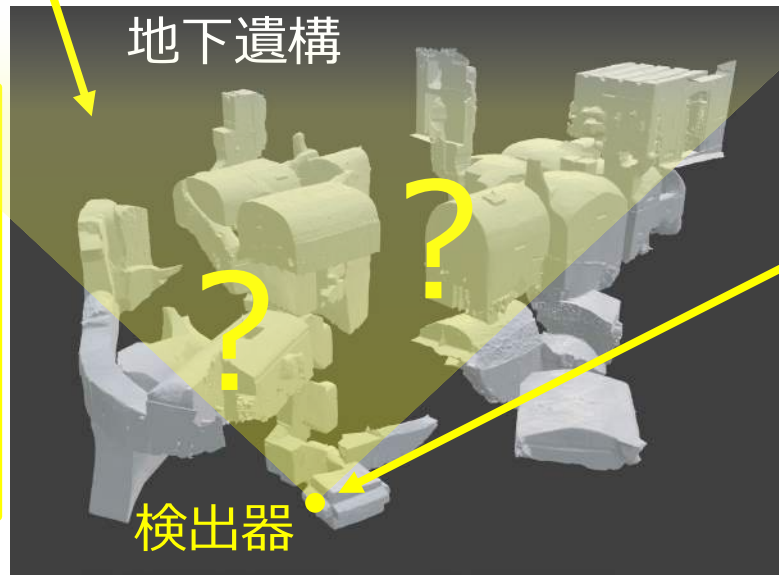
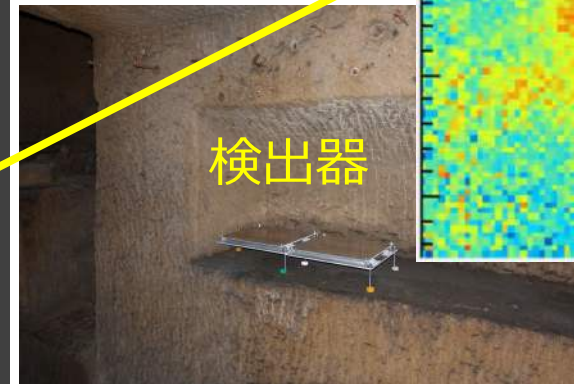
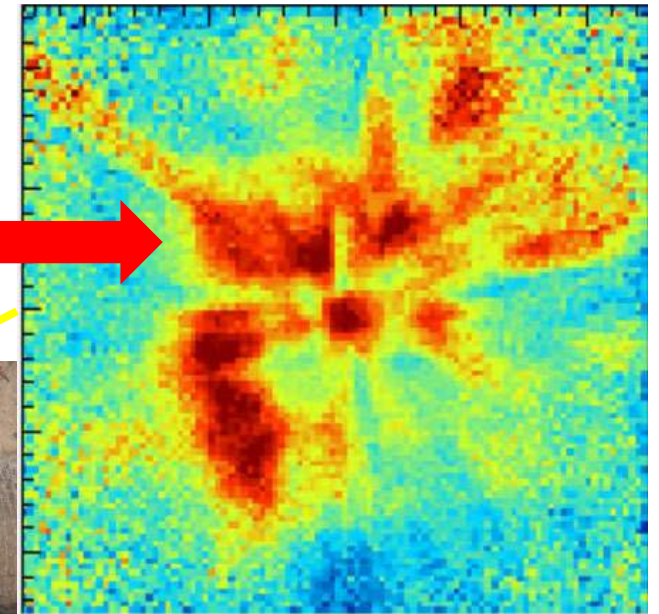
ナポリ大学との共同研究



ギリシャ時代の墓室と考えられる
未知の空洞を発見！

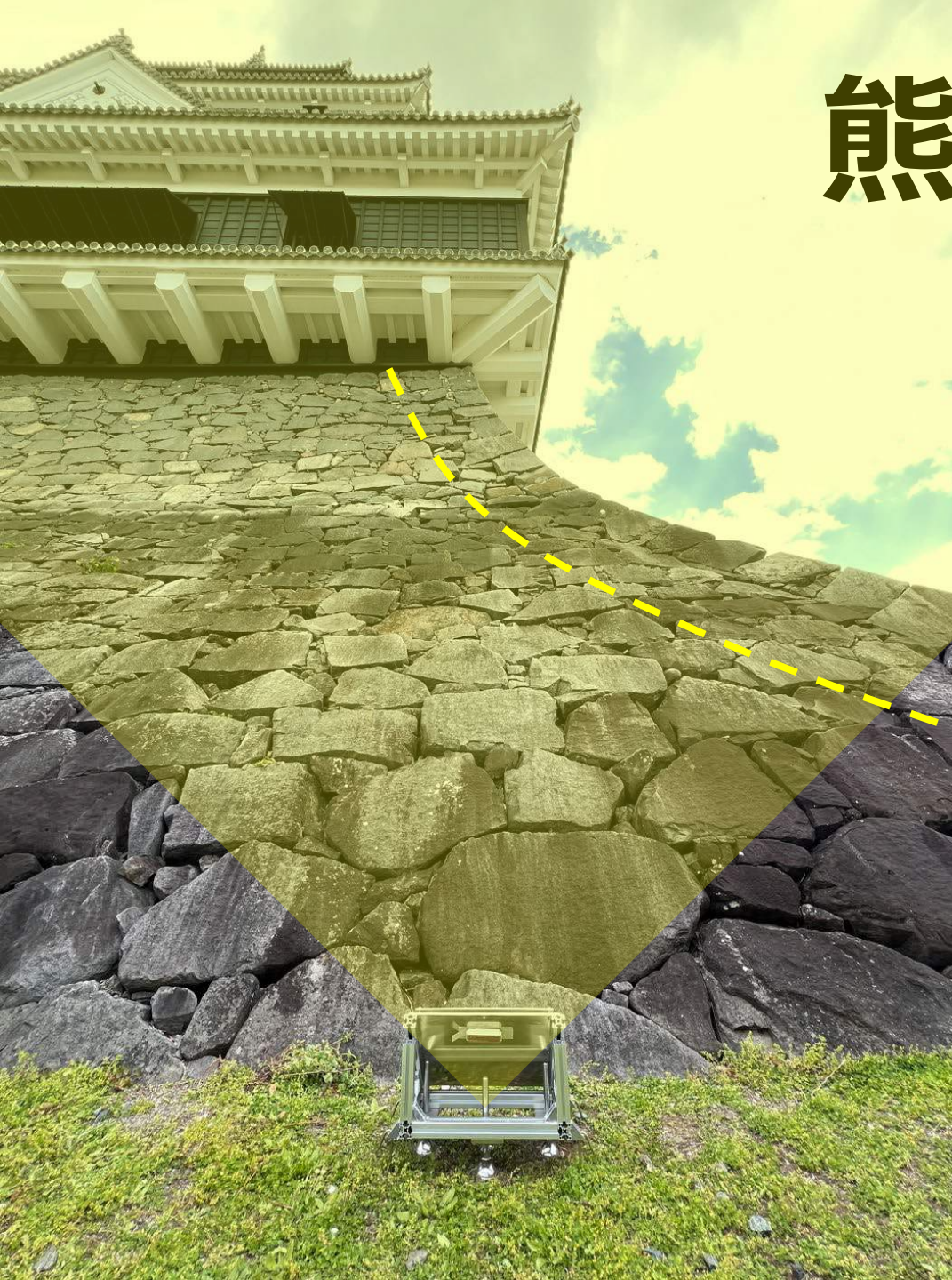
V.T, K.Morishima, N.Kitagawa et al., Scientific Reports (2023)

地下構造の宇宙線イメージ



熊本城の石垣の計測

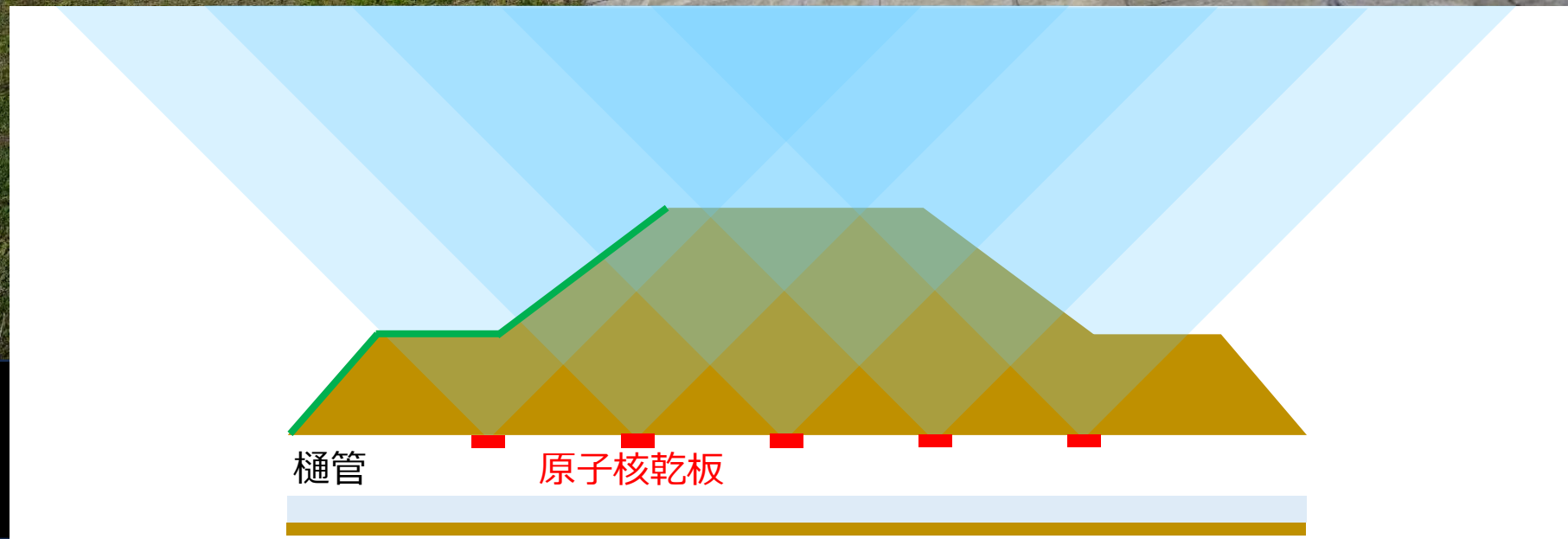
- 土（内側）と石（外側）の積層構造
- 築石と裏込め石、盛土の違いを検知できるか？
- 石垣の耐震性評価につながる



宇宙線イメージングの対象



新潟県の堤防



樁管

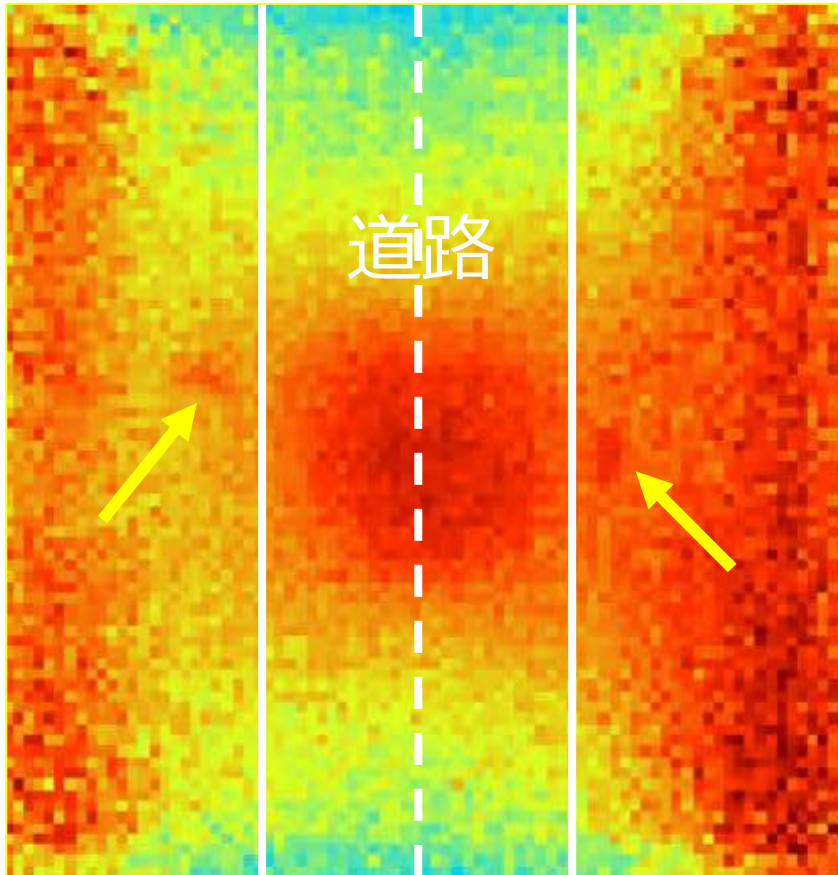
原子核乾板

新潟県の堤防



堤体内部のイメージング結果

道路わきのハンドホール（1立方メートル）の検知に成功！



ハンドホールの蓋



河川堤防の外側からの観測

原子核乾板

原子核乾板

大室山（静岡, 日本）

山体の周囲の11か所に原子核乾板を設置



Photography by UAV, Koyama

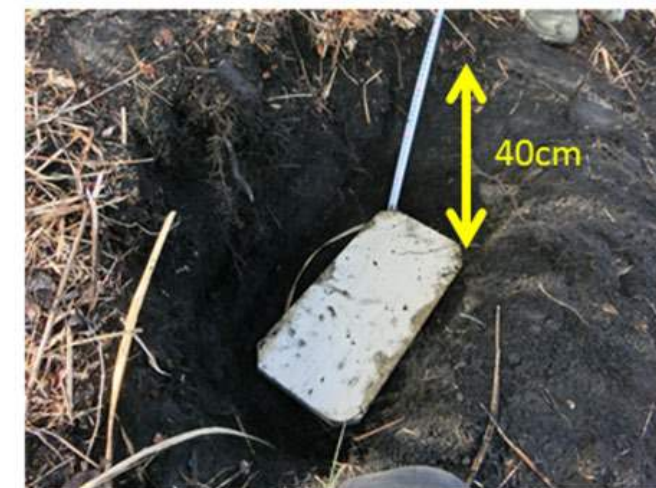
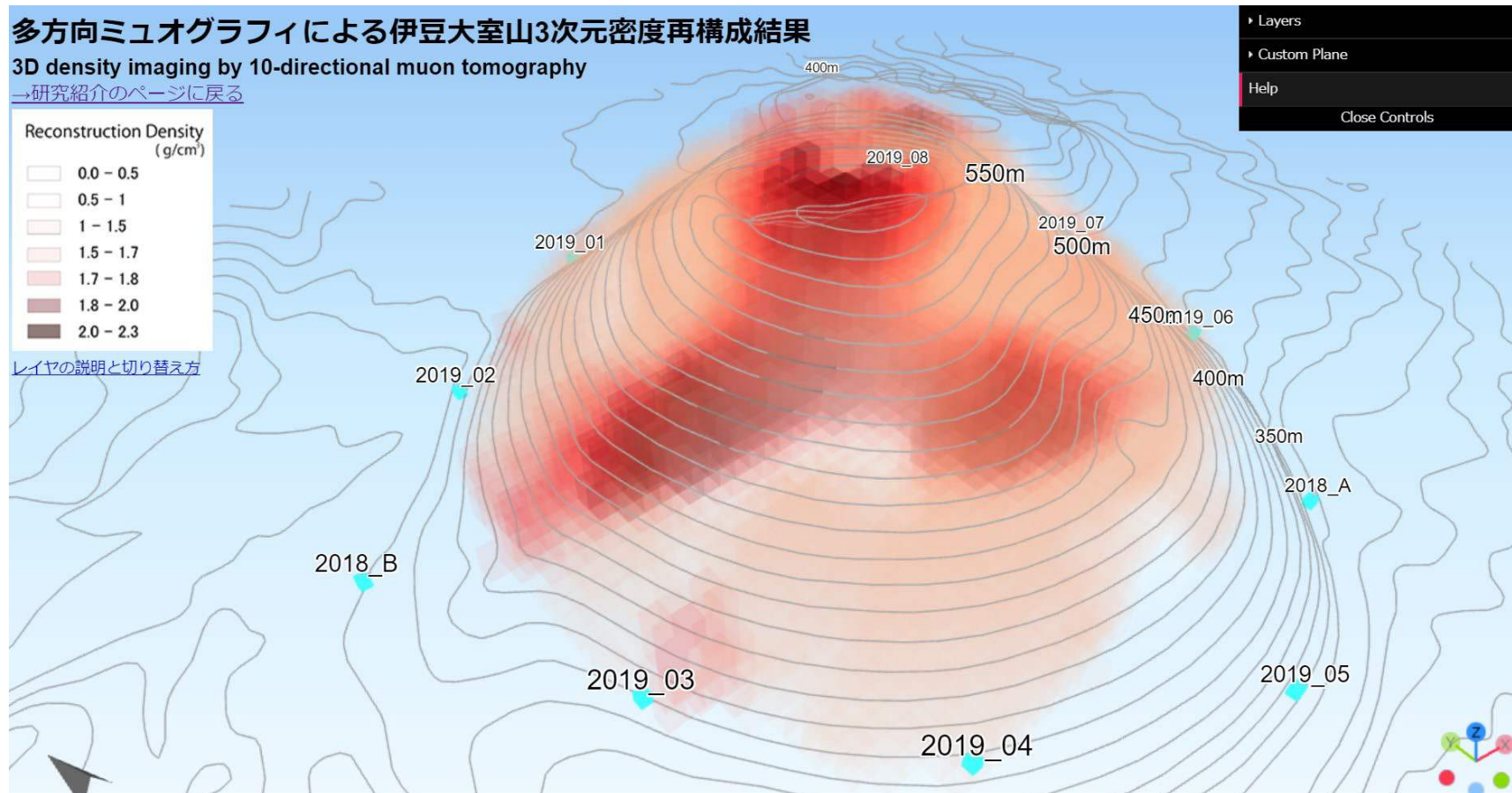
土中に埋める



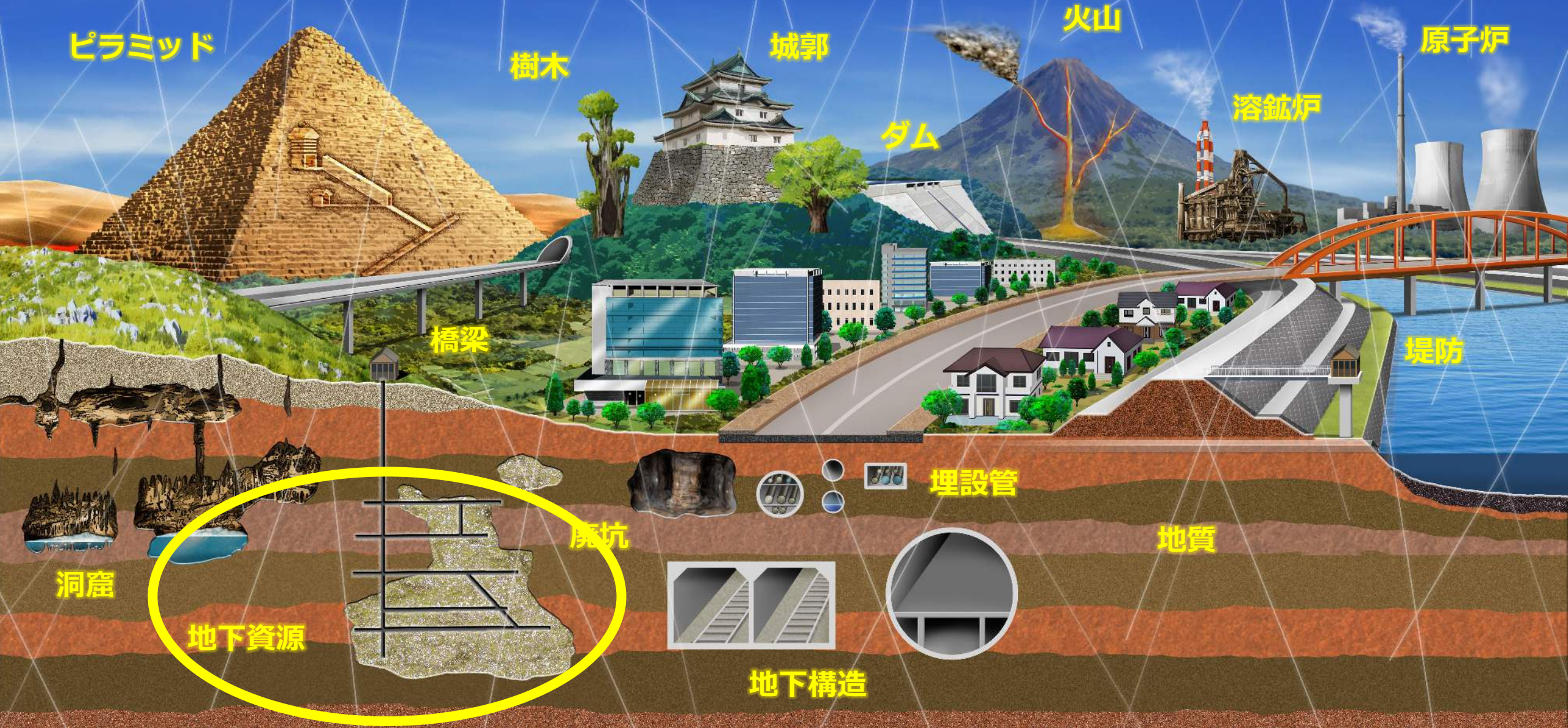
大室山（静岡, 日本）

山体の周囲の11か所に原子核乾板を設置

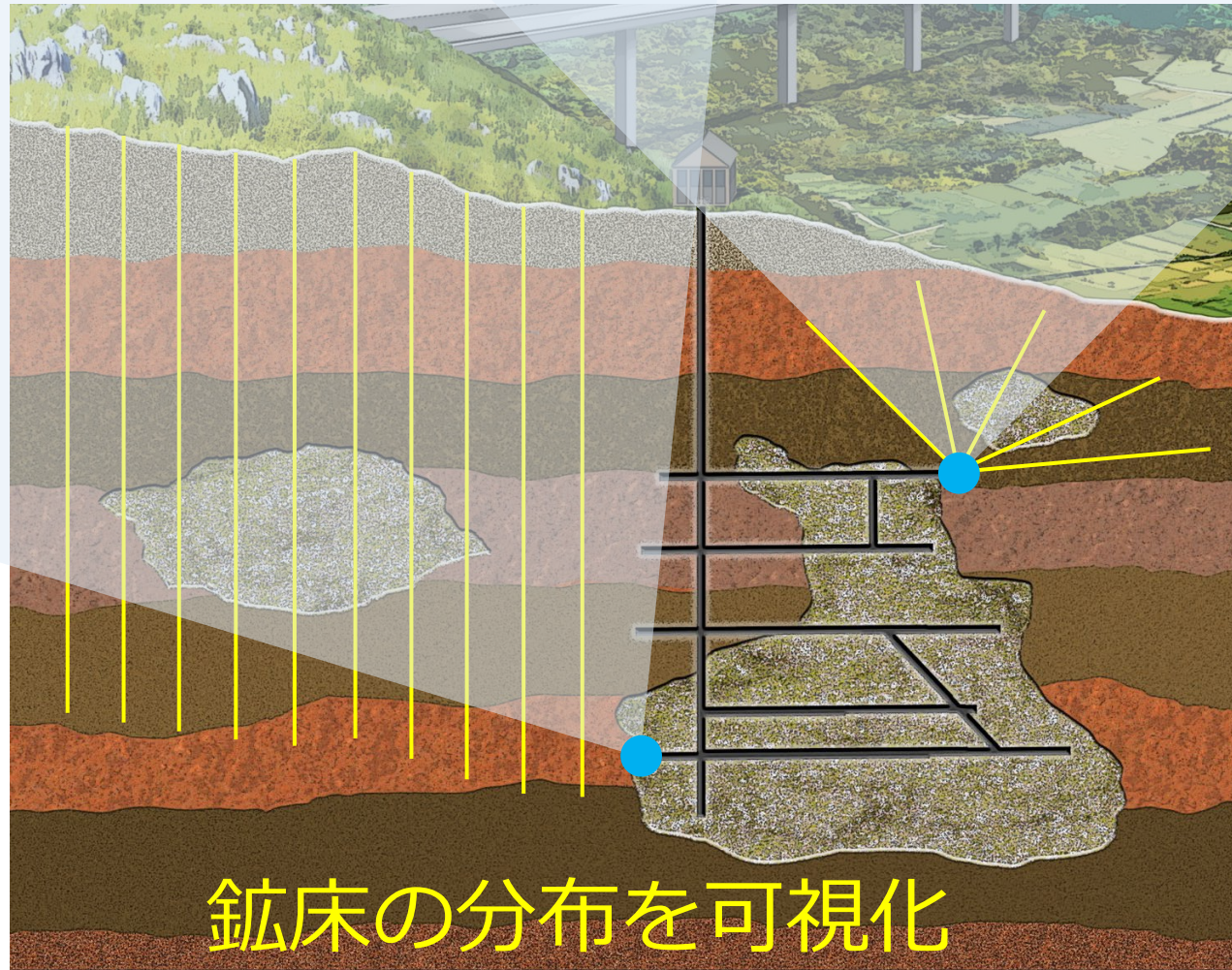
土中に埋める



宇宙線イメージングの対象



宇宙線イメージングによる地下鉱床探査

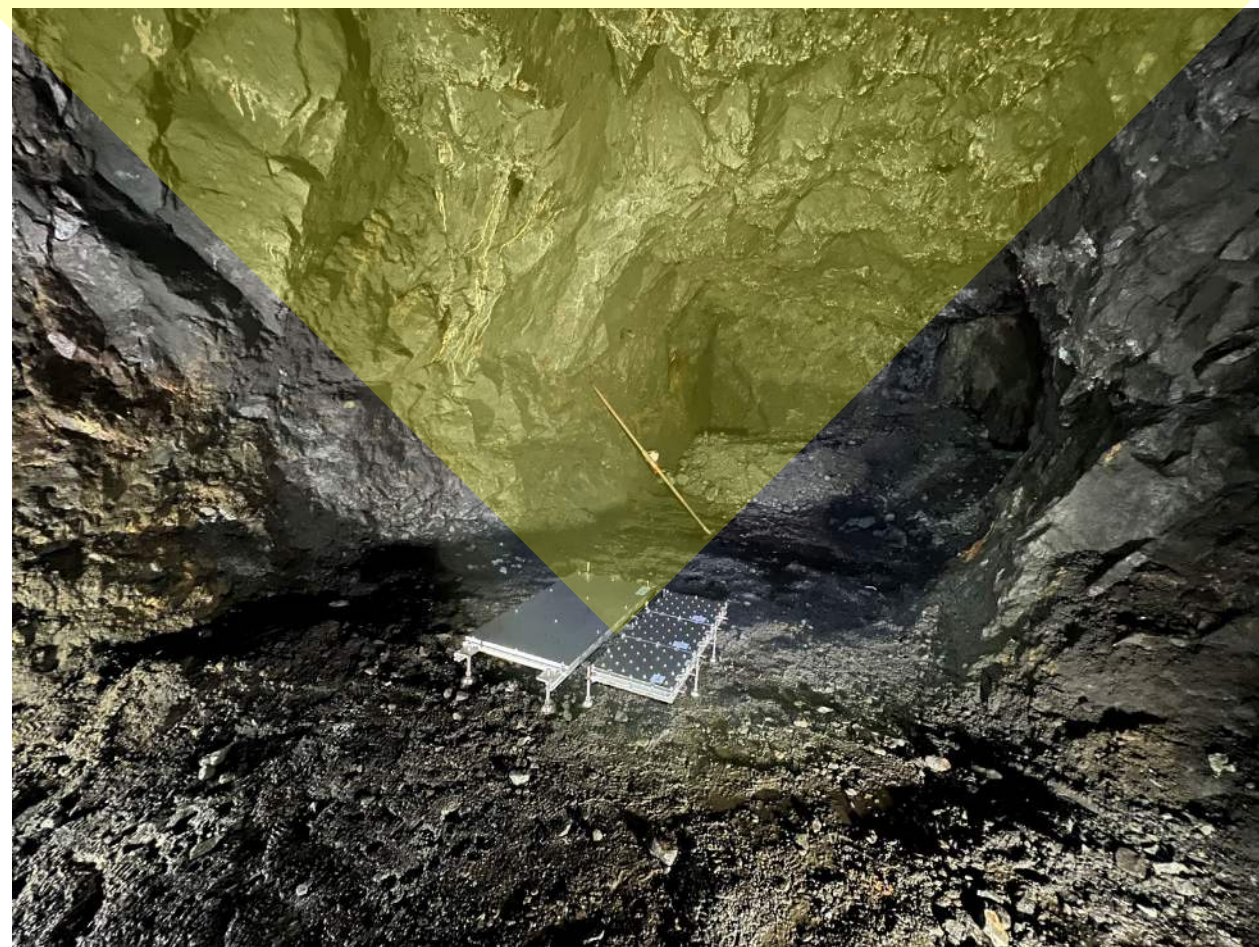


資源探査における最後の決め手は
ボーリング調査

1000本に3本の成功率！！

効率的な探査技術が
求められている！

地下資源探査技術の開発（釜石鉦山）

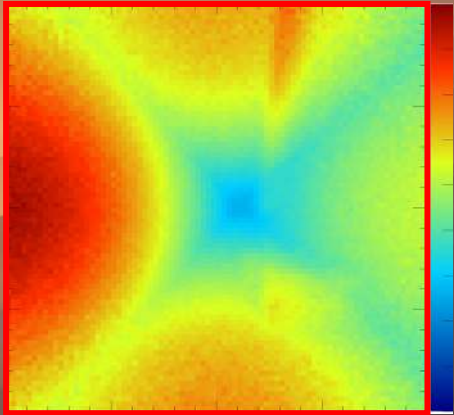


宇宙線によるピラミッドの新空間の発見

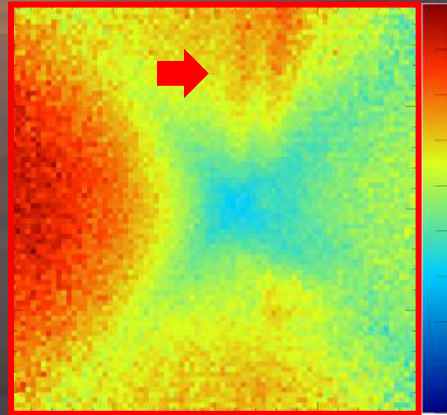
K. Morishima et. al., Nature 552, 386 (2017)

19世紀以降に初めて発見された2つの未知の内部構造

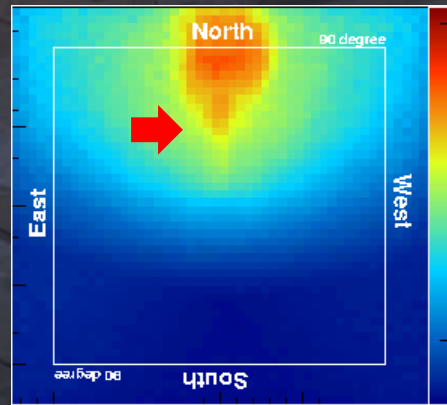
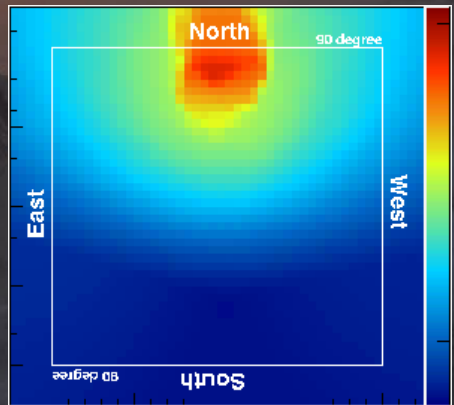
シミュレーション画像



観測結果



- 中心部の巨大空間の形状解明 → 発掘調査
- 2つの空間の関連の有無



多い

ミュオン
フラックス
(飛来頻度)

少ない

