

oho23 夜話

宇宙線ミュオンによる  
ピラミッド探索

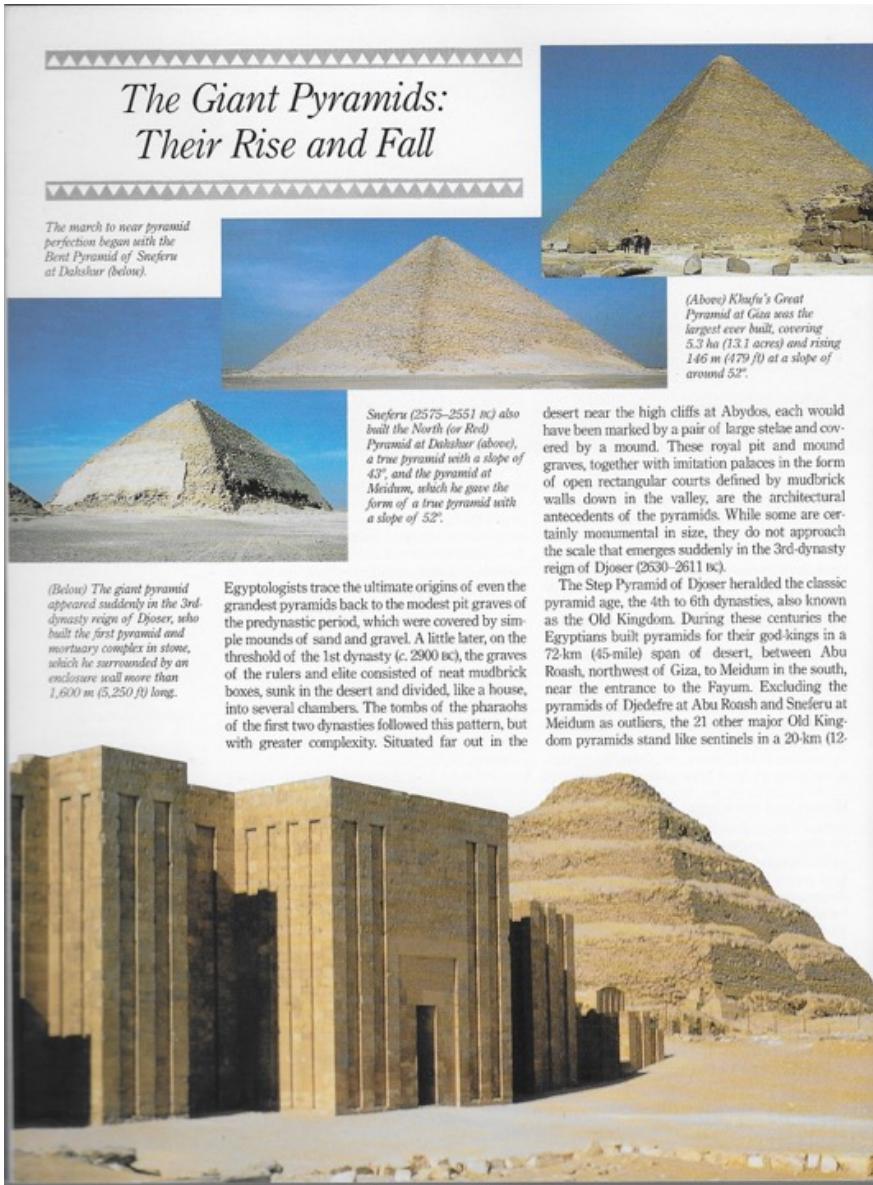
2023.09.06

佐藤 康太郎

KEK

# 話の順序

- ・はじめに.
- ・ピラミッドの概略、略歴.
- ・クフ王ピラミッドへのKEK検出器の設置.
- ・KEK検出器によるデータ解析.
- ・写真集.
- ・ScanPyramidsのその他の活動、課題.



## 有名なピラミッド

### クフ王 大ピラミッド

### スネフェル王 赤（北）のピラミッド

### スネフェル王 屈折ピラミッド

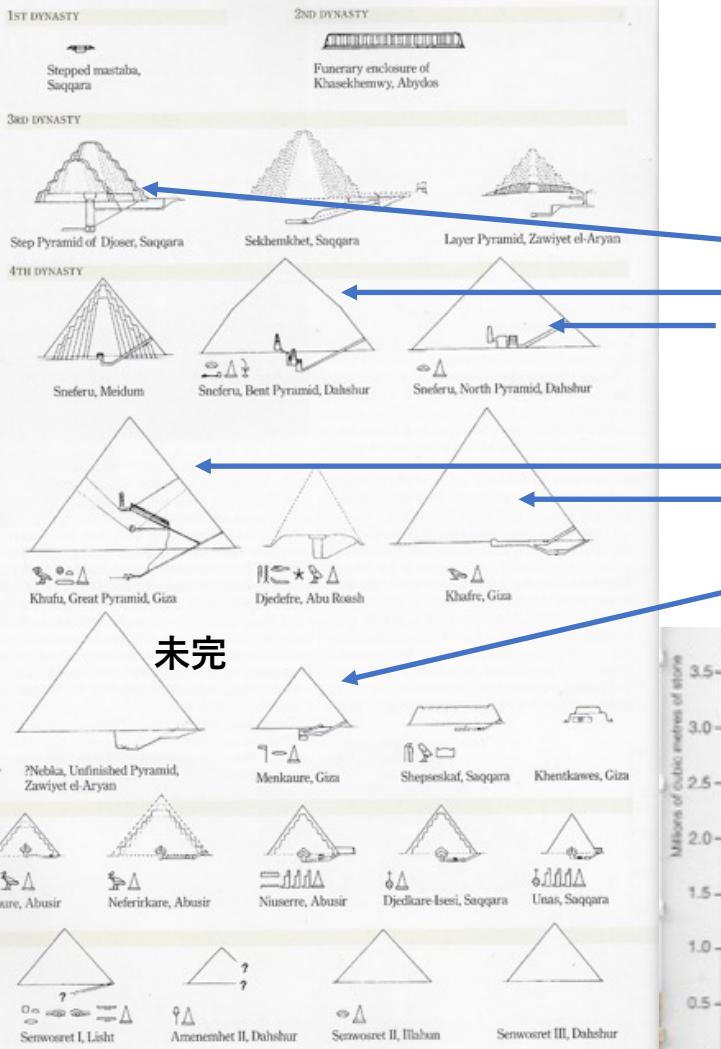
### ジェセル(Djoser)王 階段ピラミッド

*Lehner, M. The Complete Pyramids*

## The Shape of Pyramid History

Profiles of the major pyramids, drawn to the same scale, from the earliest stepped mound of the 1st dynasty, through the stepped pyramids of the 3rd dynasty and the massive 4th-dynasty pyramids, to the much smaller monuments of later Egyptian history. According to one chronology only 60 years passed between the completion of the Step Pyramid of Djoser and the beginning of the Great Pyramid of Khufu. If so, someone could have been a small child when Djoser's pyramid was new, and lived to see, in old age, the building of the Great Pyramid, when 'Egyptian masonry rose to a peak of excellence'. The giant pyramids represent an accelerated cultural development, comparable to our modern space programme or computer revolution.

After the end of the 5th dynasty, pyramid entrances are no longer consistently on the north, and the passages and chambers follow circuitous routes, so that the profiles do not show the interiors.



# 有名なピラミッドはいつ頃作られたのか

## 階段ピラミッド

## 屈折、赤のピラミッド

## クフ、カフラー、メンカウラー王のピラミッド

2600 ~ 2450 BC

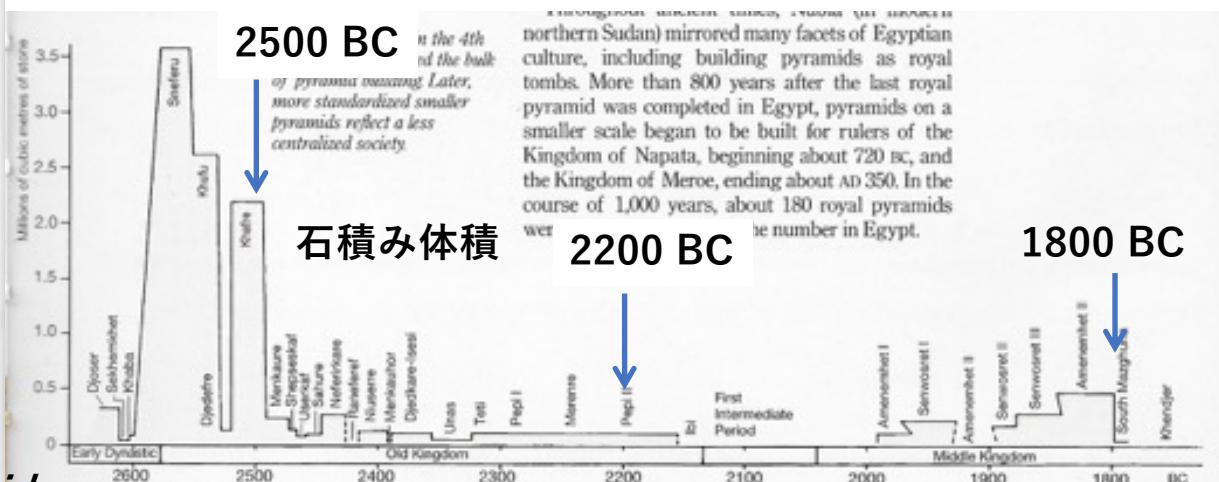
2500 BC

*In the 4th  
of the bulk  
of pyramids rising. Later,  
more standardized smaller  
pyramids reflect a less  
centralized society.*

## 石積み体積

2200 BC

1800 BC

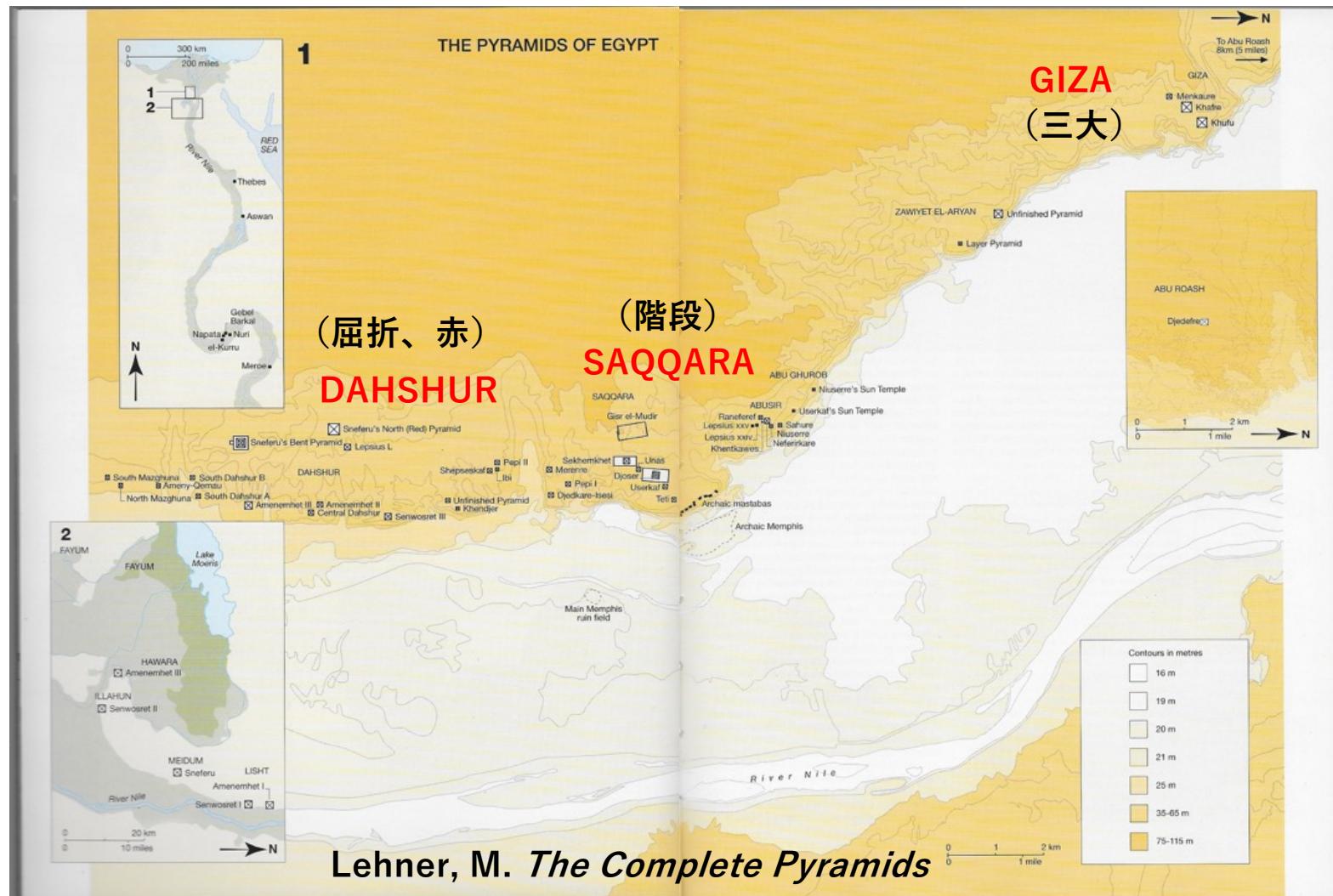


n the 4th  
of the bulk  
of pyramids rising. Later,  
more standardized smaller  
pyramids reflect a less  
centralized society.

2200 BC

1800 BC

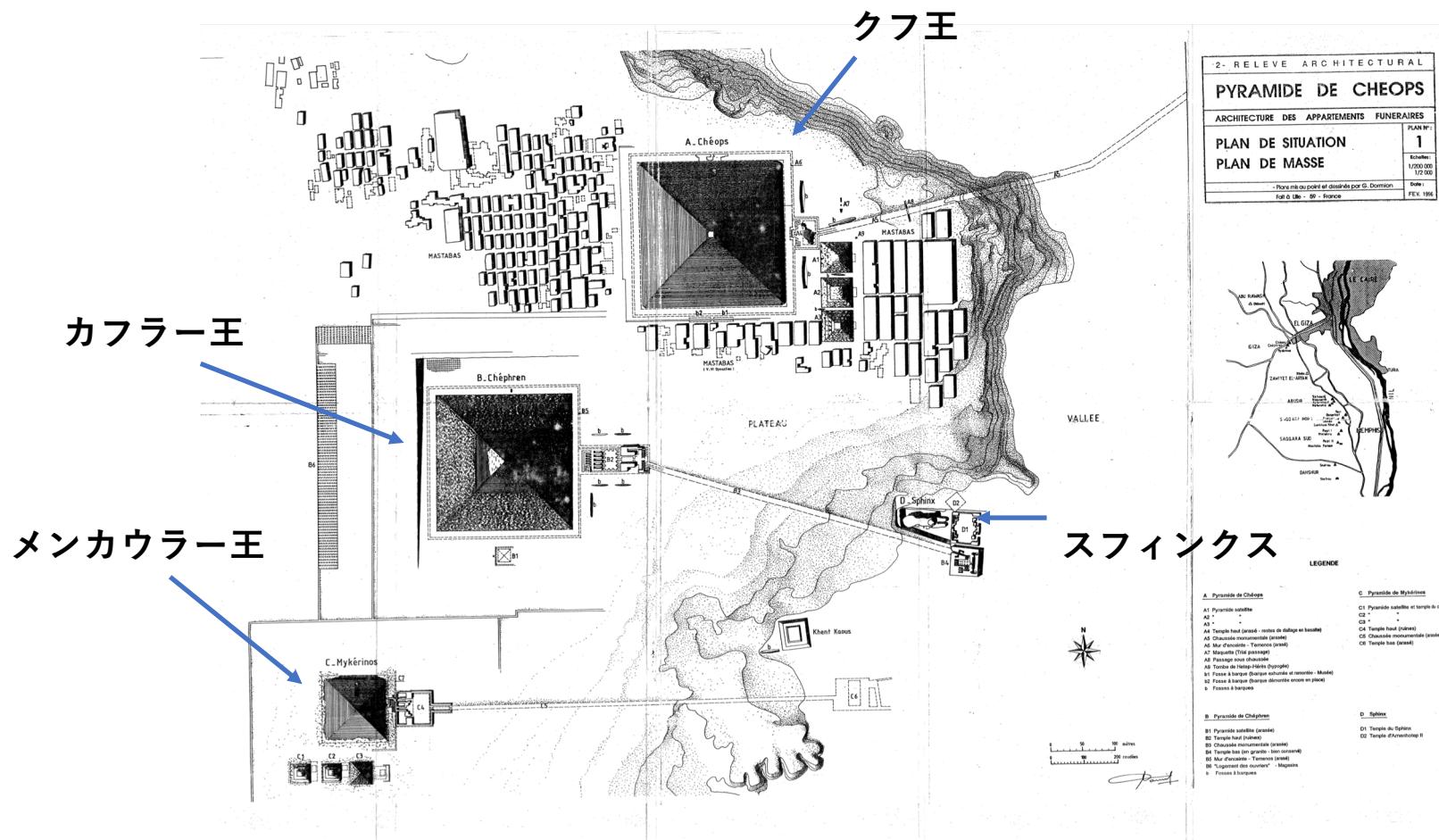
有名なピラミッド  
はどこにあるか



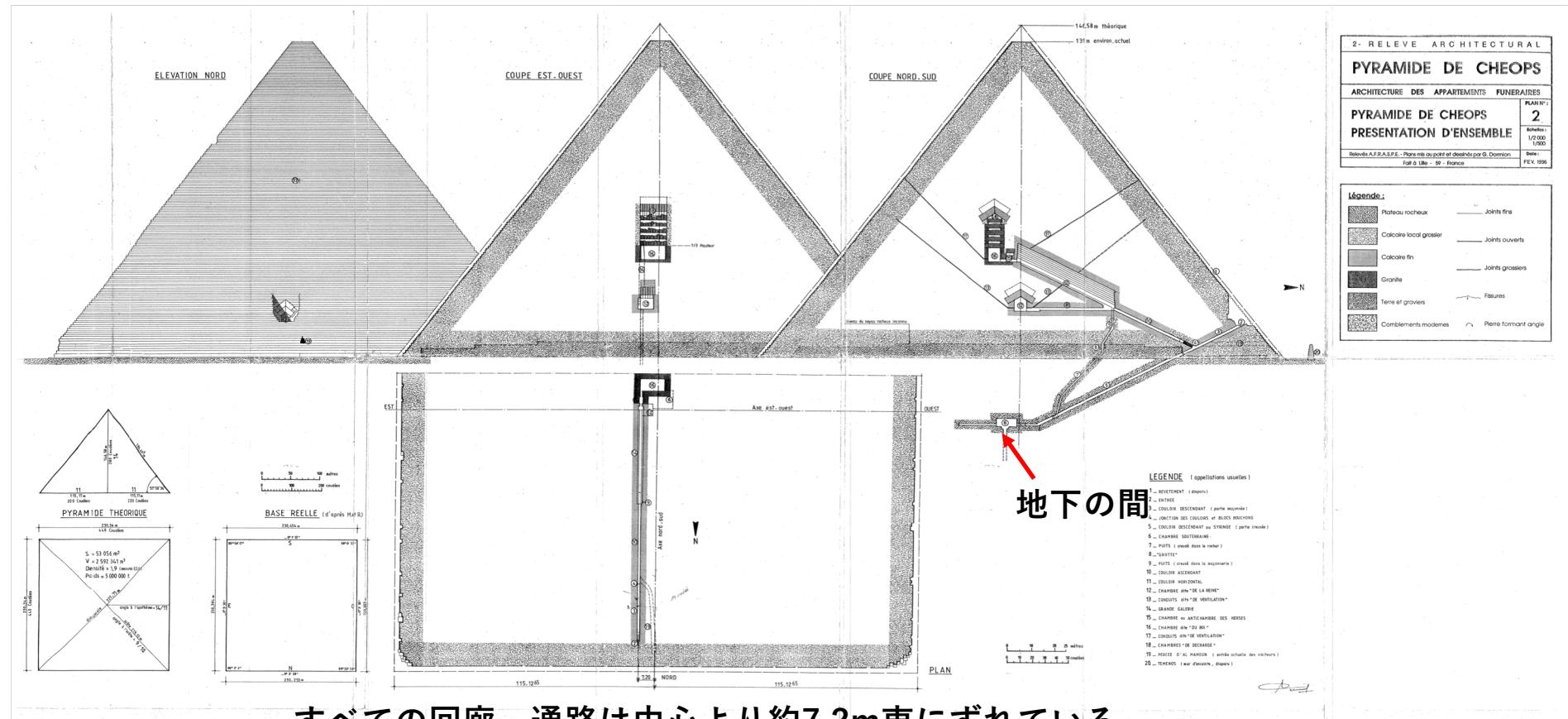
# ピラミッドの略歴

- 2600 ~2450 BCごろに建設の最盛期。ギザの三大ピラミッド。  
その後、100基以上のピラミッドが建設された。
- 紀元前5世紀のヘロドトス『歴史』で大ピラミッド記述。
- 820年ごろ、サラセン帝国のアル・マムーンが盗掘口を開ける。
- 1798年ナポレオンのエジプト遠征。3万8千人の軍隊。  
150人以上のフランス学士院会員が遠征隊に参加。（フーリエ、モンジュ）  
1809 ~ 1827年 全20巻の「エジプト誌」出版。
- 1967年ごろ、アルバレ がカフラー王ピラミッドでミュオン透視。
- 2016年、ScanPyramids クフ王ピラミッドで測定開始。  
2017年、Big Void 発見公表。
- 2023年、入り口上方の回廊発見公表。

# ギザの3大ピラミッド

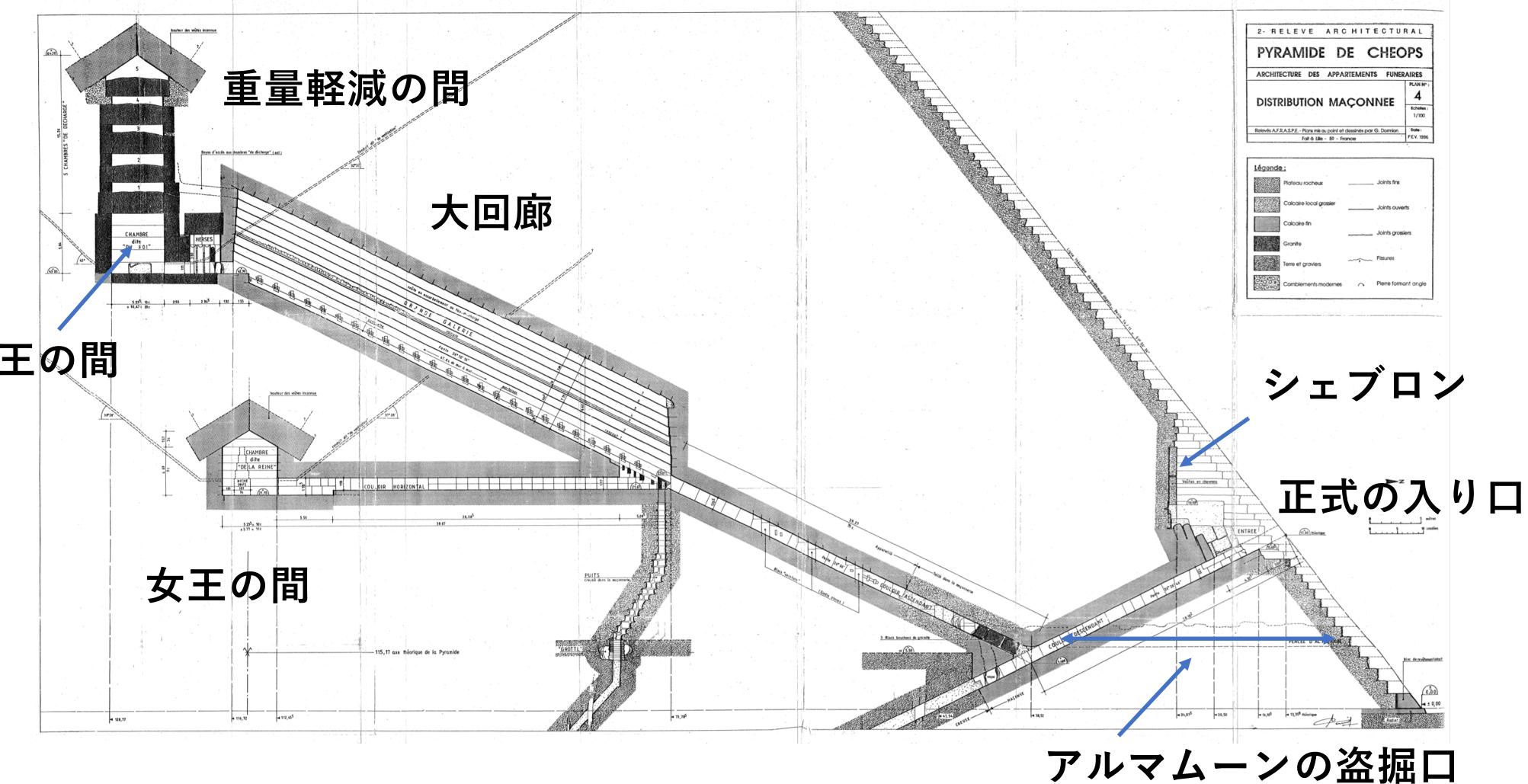


# クフ王のピラミッド



すべての回廊、通路は中心より約7.2m東にずれている  
空間がほぼ平面上にあるので、透視で位置を決めることは難しい。

## ピラミッド地上部の既知の内部構造



# ScanPyramids KEK チーム





シェブロン

正式入り口

盗掘口

盗掘口からの  
搬入





搬入の難所

上昇通路





大回廊への分岐

女王の間への水平通路入り口

大回廊を見上げる





女王の間への水平通路



女王の間に設置した  
KEK検出装置

上部二層のシンチレータ  
とDAQ box



by Kouhei HAYASHI

設置後のKEKチームと  
エジプトの関係者

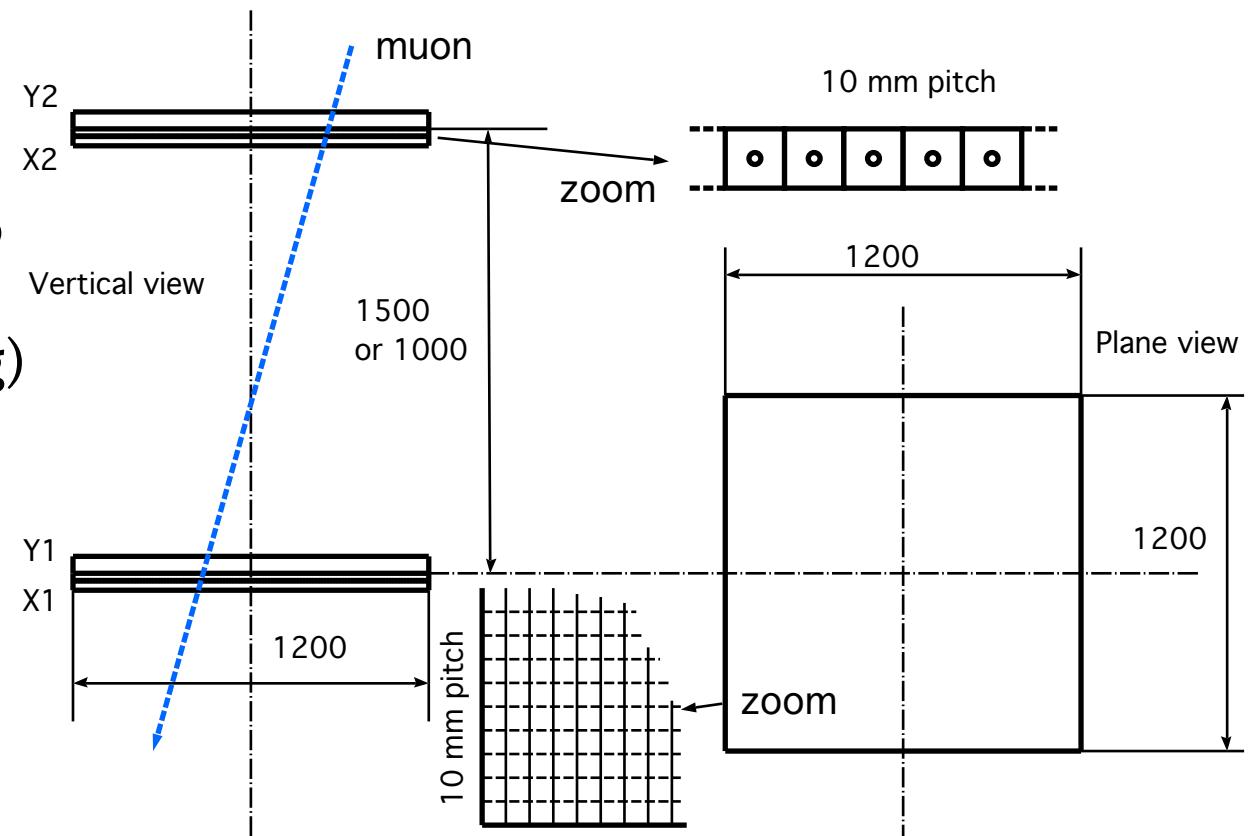


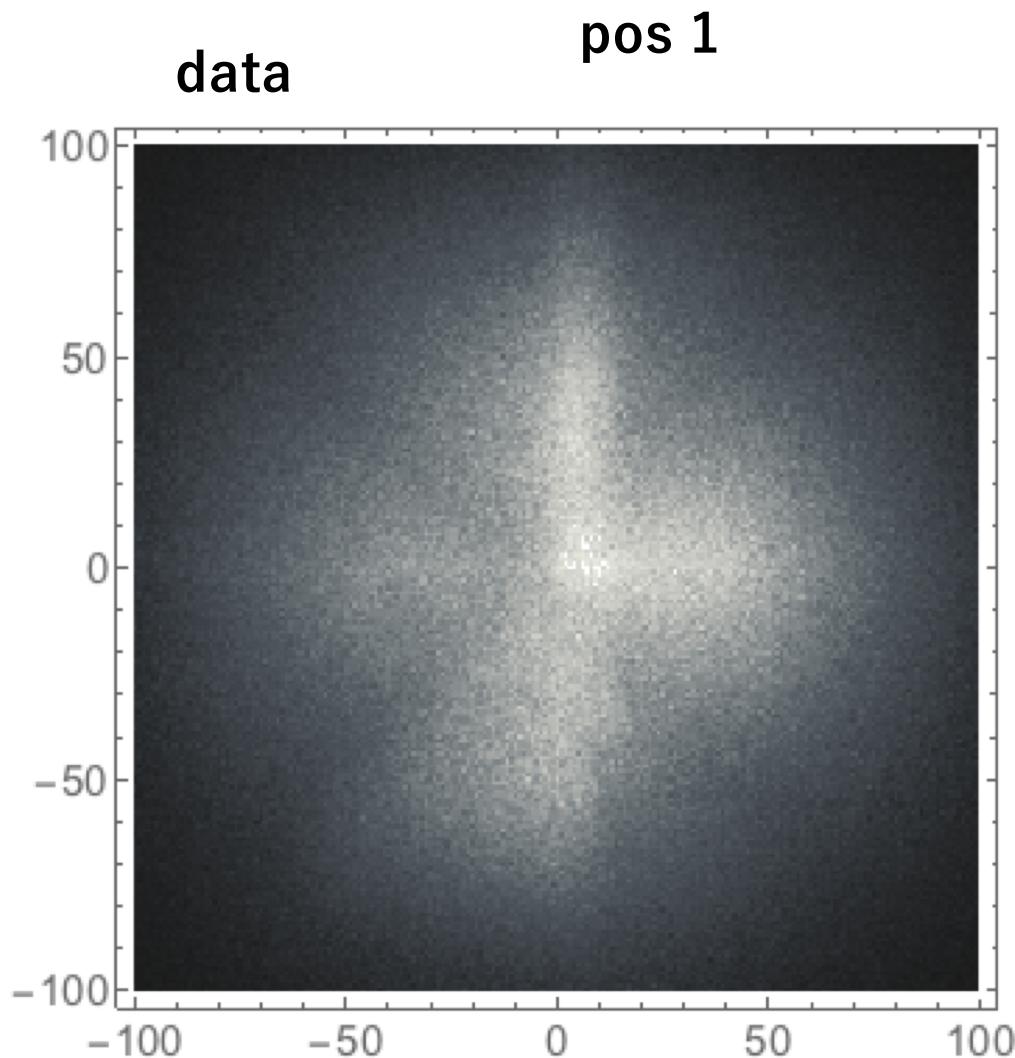
## 検出装置

- 10mm角のプラスチックシンチレータが上下2層ずつ
- 1200mm<sup>2</sup>平方の検出面
- 運搬のために二つ折り(60 kg)
- MPPCによる光検出
- DAQ boxデータをPCで処理

### Eventの条件

- 四層すべての同期信号
- 1-cluster
- 1 or 2 hit





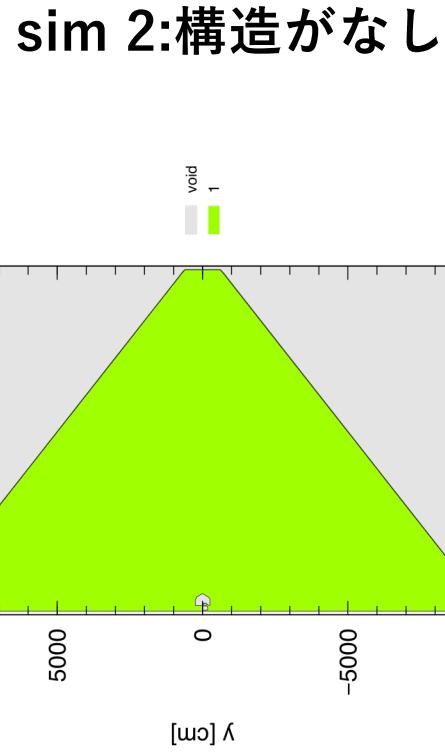
横軸、縦軸のbinは上下の  
シンチレータのチャネル番号の差  
進行方向の角度 (tangent)

例えば、番号の差50は、  
上下でのずれが500mmで  
上下のgapが1500mmでは  
角度（傾き）は $500/1500$ ,  
0.333 となる。

ピラミッドを上から見ていて、  
上方が北、左右は西東

200 bin x 200 binでの  
event histogram

no. = 1, ie = 1, ix = 1  
 emin = 0.0000E+00 [MeV]  
 emax = 1.0000E+05 [MeV]  
 xmin = 2.0000E+02 [cm]  
 xmax = 1.0000E+03 [cm]  
 part. = muon-



plotted by Argel- 4.35

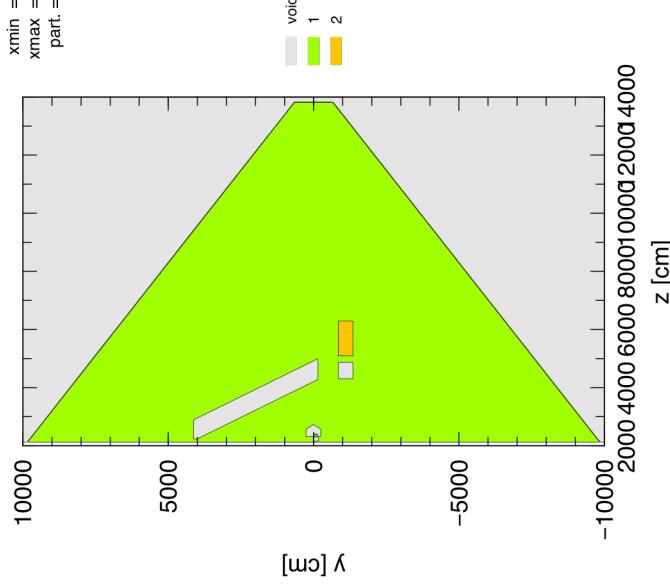
calculated by PhITS 2.8

## PHITS simulation

**sim 2:構造がなし**

**sim 1b:既知の構造**

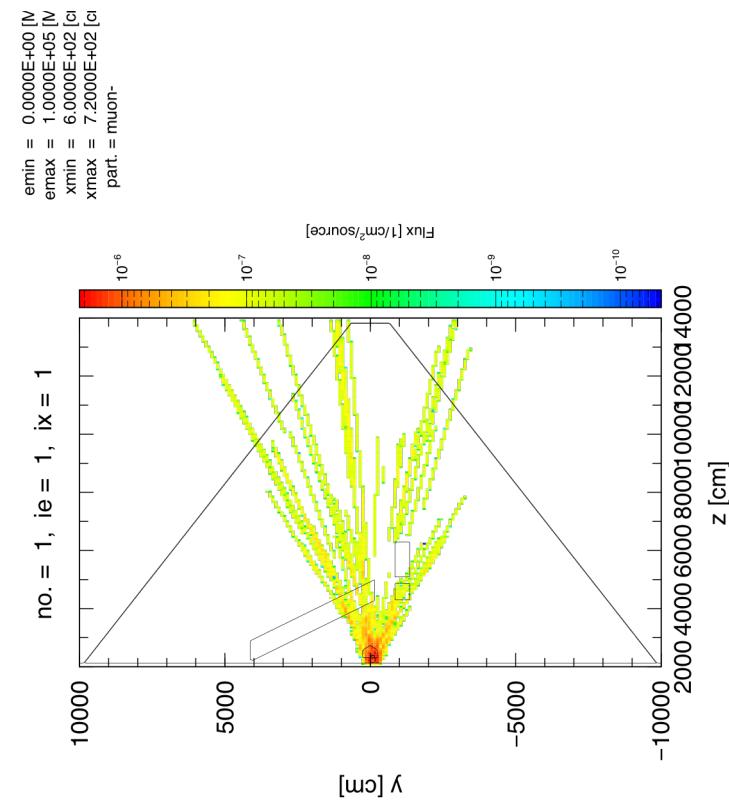
no. = 1, ie = 1, ix = 1  
 emin = 0.0000E+00 [MeV]  
 emax = 1.0000E+05 [MeV]  
 xmin = 6.0000E+02 [cm]  
 xmax = 7.2000E+02 [cm]  
 part. = muon-



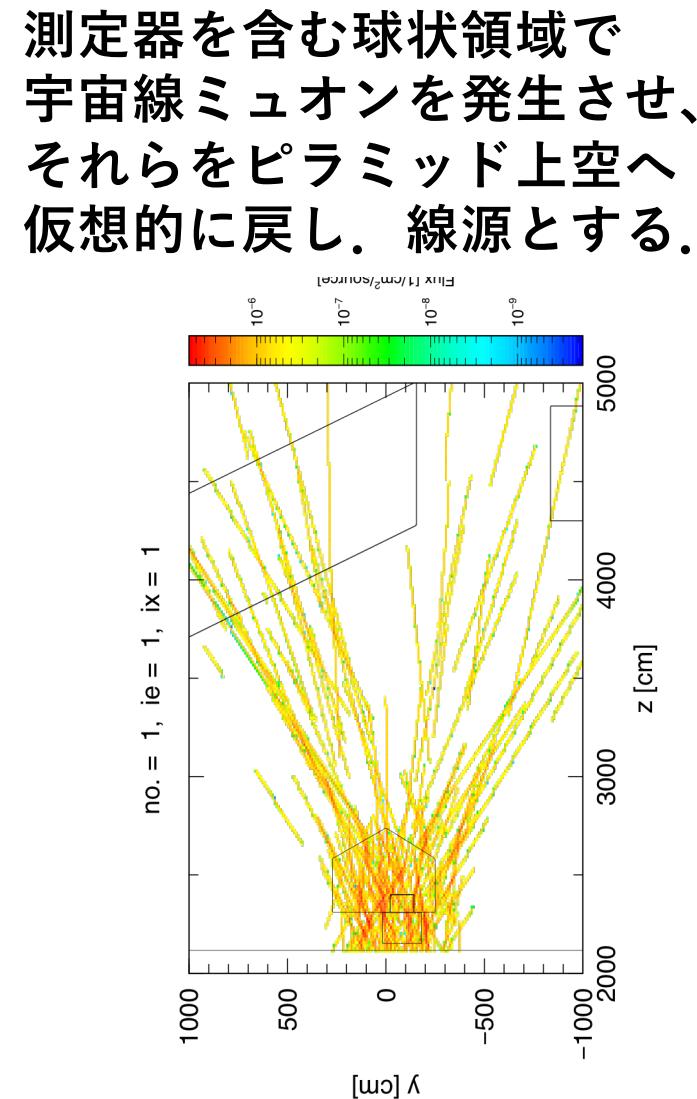
plotted by Argel- 4.35

calculated by PhITS 2.8

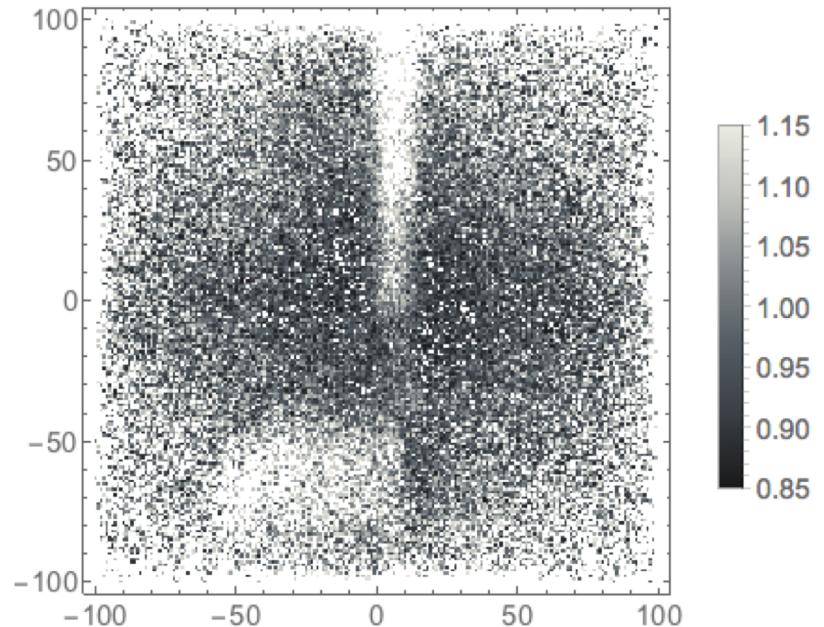
## Track Detection using [T-track] tally



## Track Detection using [T-track] tally



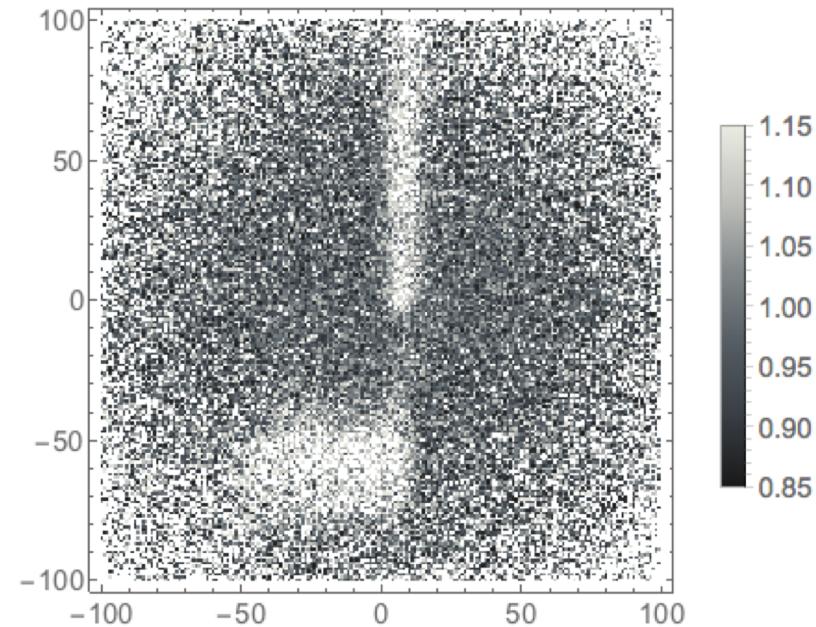
**data/sim2**



すべての構造が見えるはず

**pos1**  
割り算による規格化

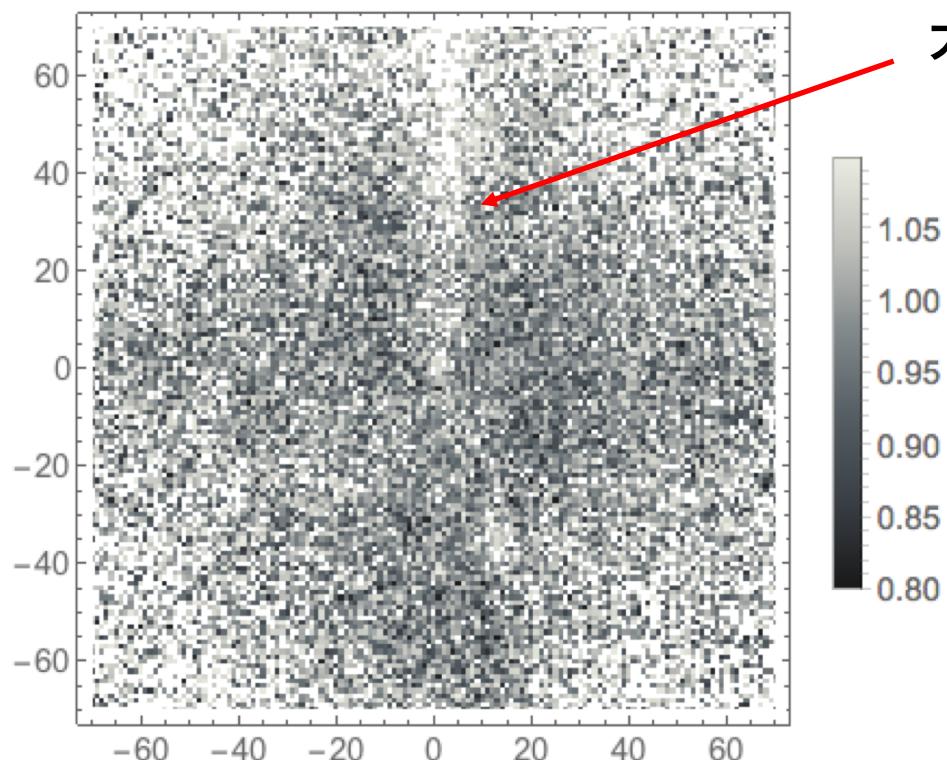
**sim1b/sim2**



既知の構造がどのように見えるか

data/sim1b

pos 1



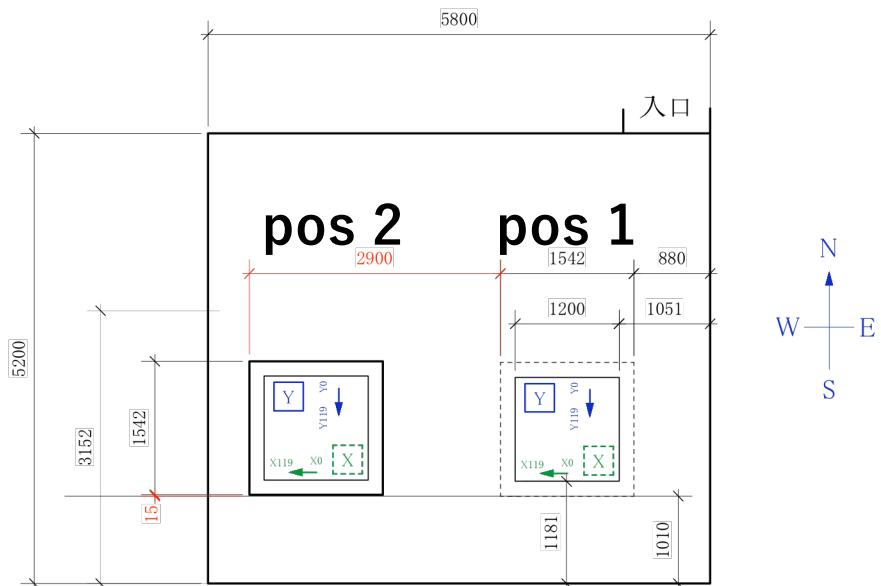
大回廊の位置でミュオンが多い

名古屋大森島グループの解析による  
新空間(Big Void)の像

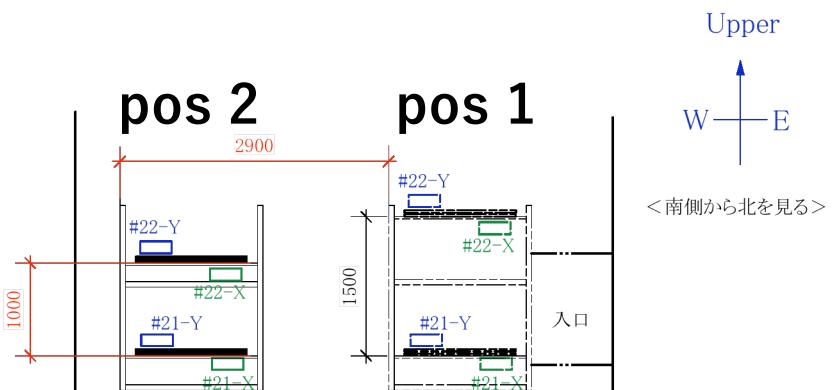
# 女王の間での測定状況

pos 1 : 2016/8 ~ 2017/1  
158 days, 4.8 M events

pos 2 : 2017/1 ~ 2019/11  
366 days, 19.6 M events



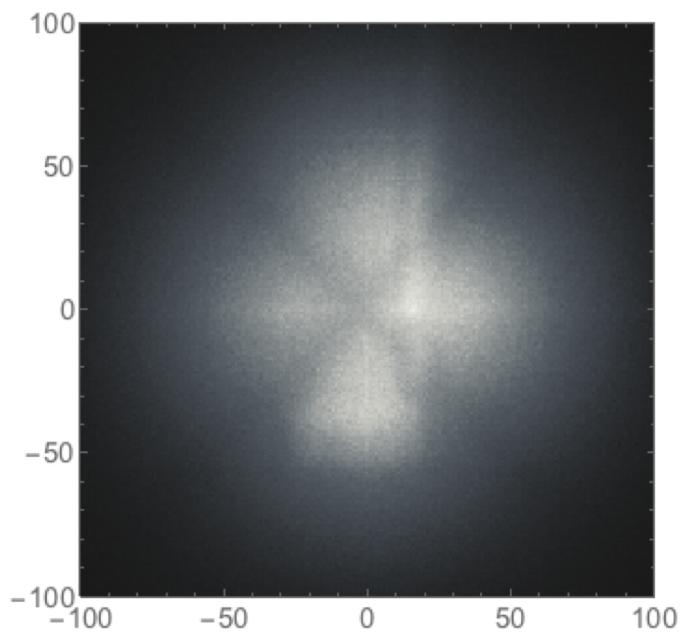
K. Hayashi, KEK



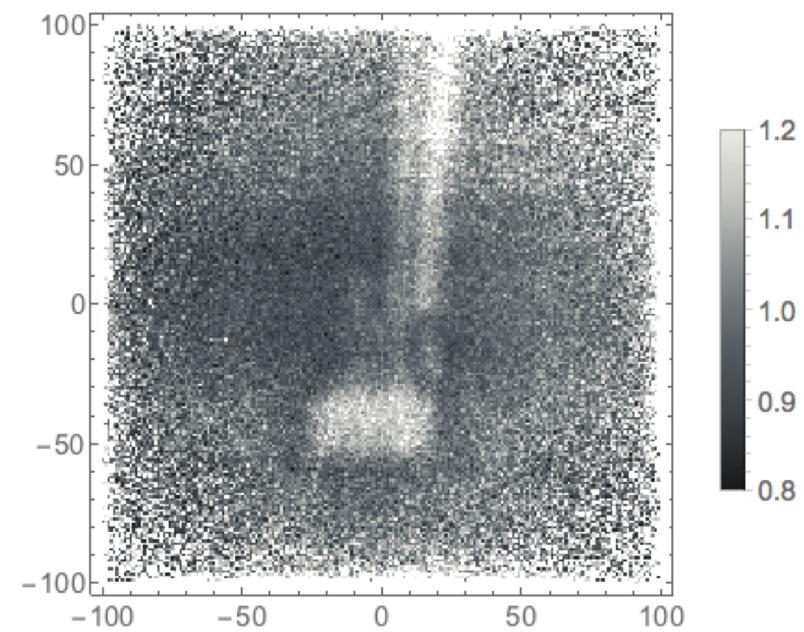
女王の間(立面図) 2017. 1. 23

**pos2**

**data**

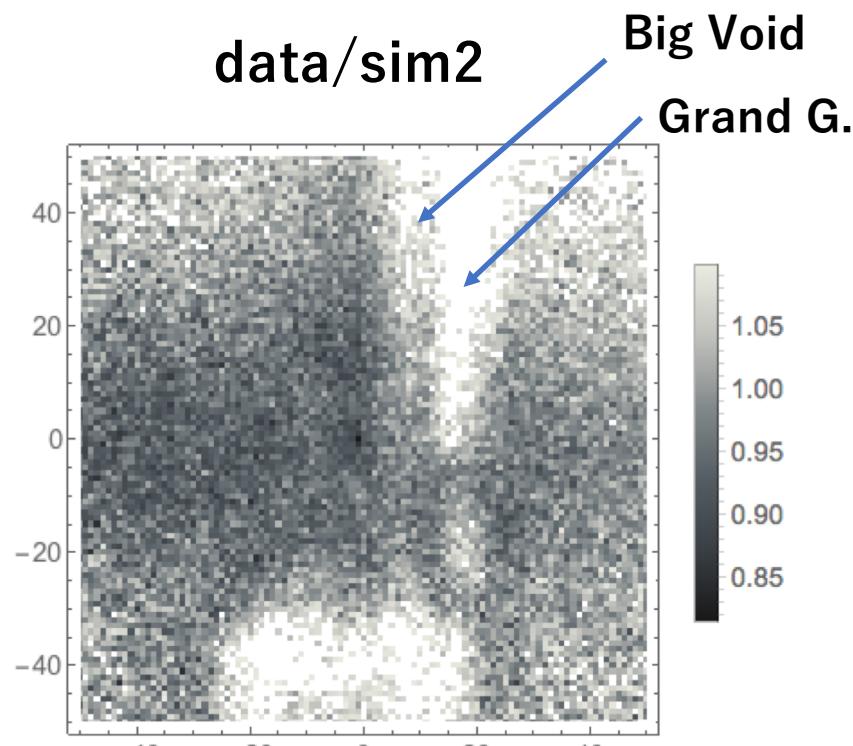


**data/sim2**



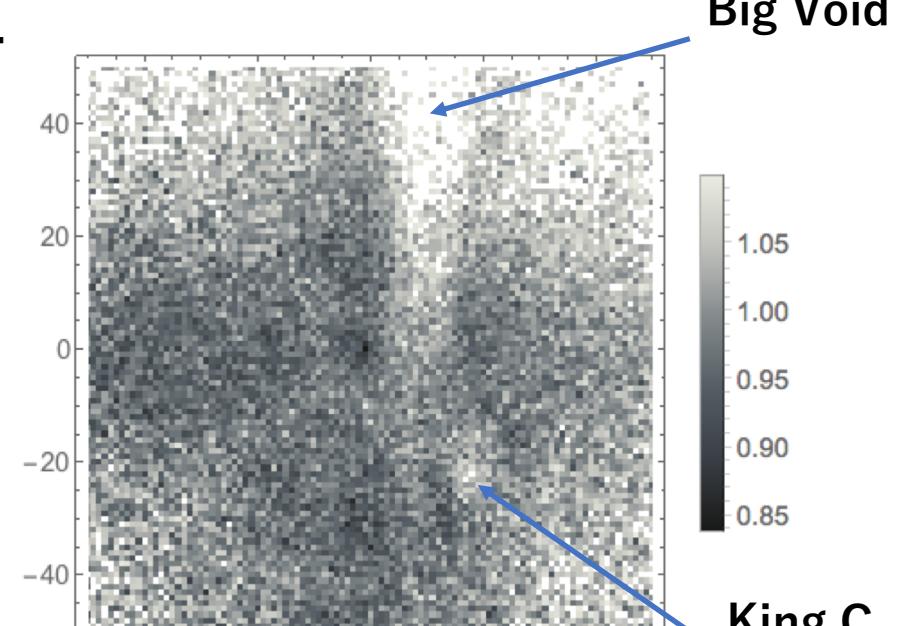
**大回廊の横に新空間が見える**

pos2



中心部の拡大

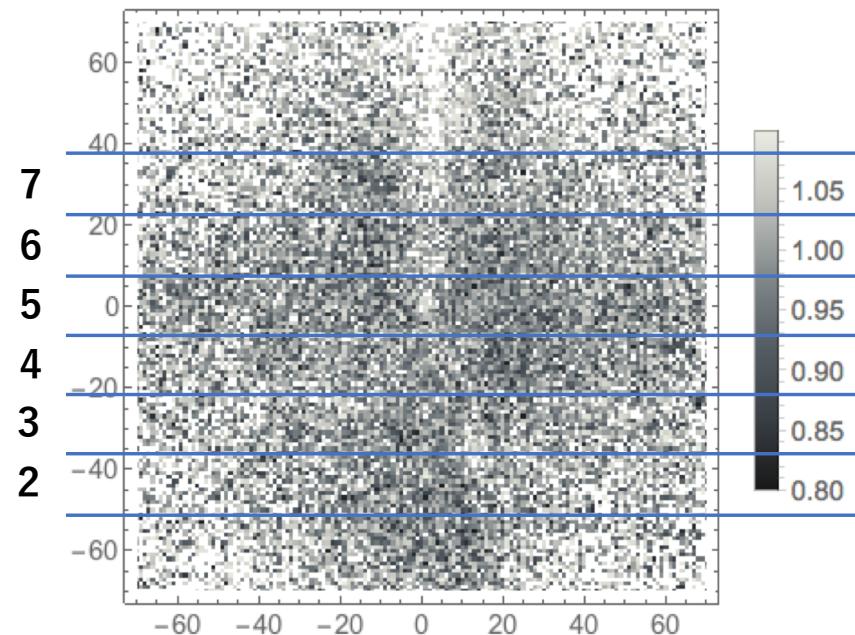
**data/sim1b**



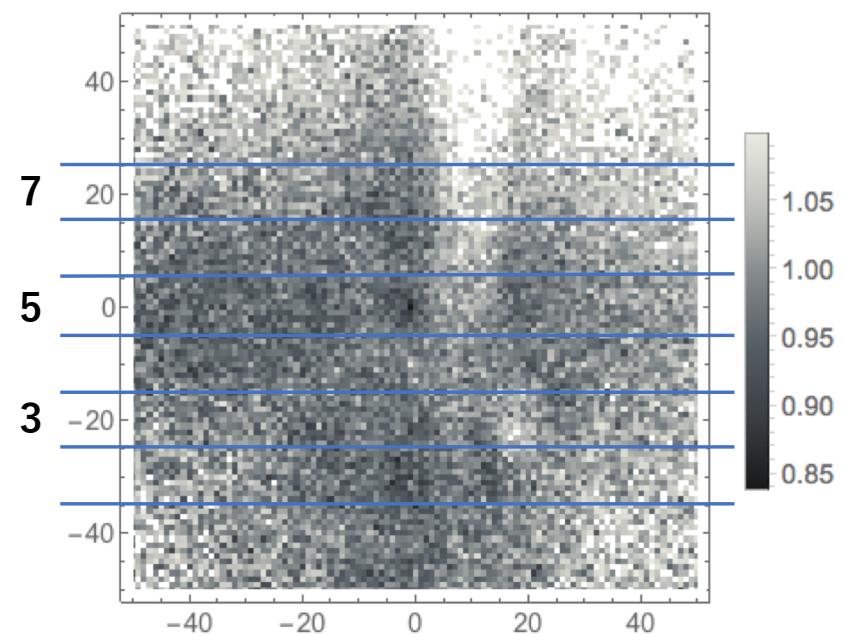
既知の構造を除く

## スライス解析

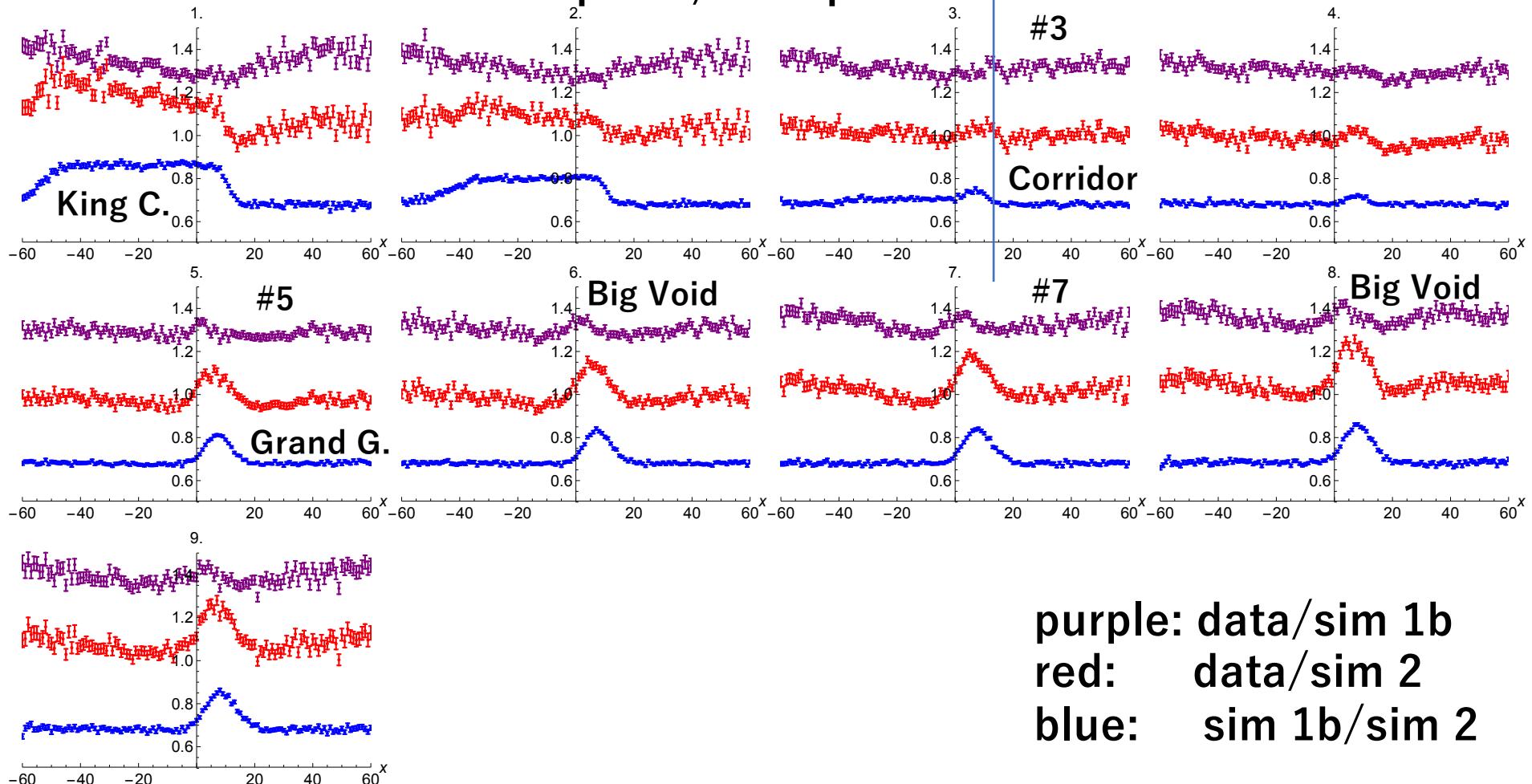
pos 1, 15 pixel sum  
data/sim 1b



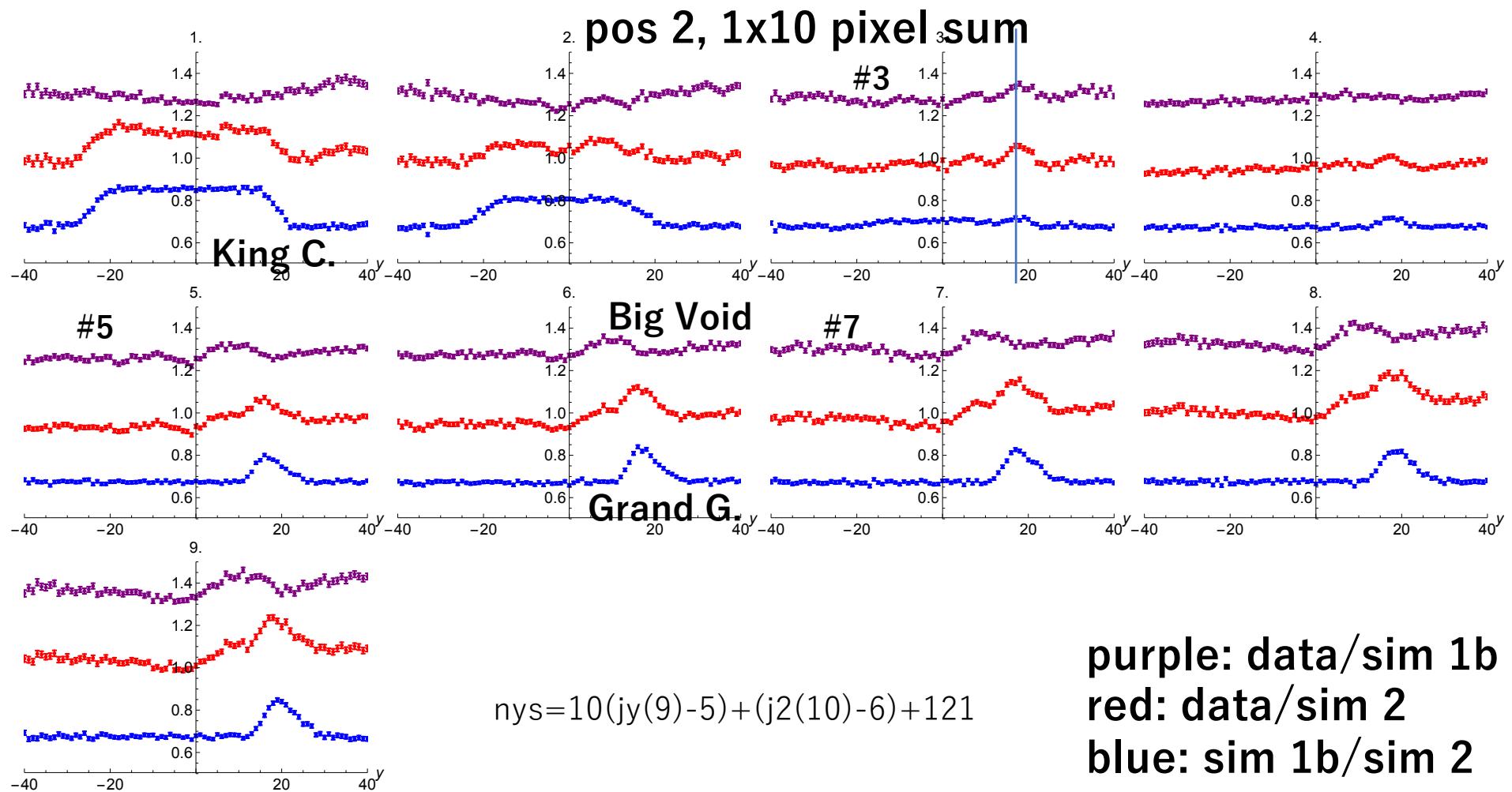
pos 2, 10 pixel sum  
data/sim 1b



## pos 1, 1x15 pixel sum

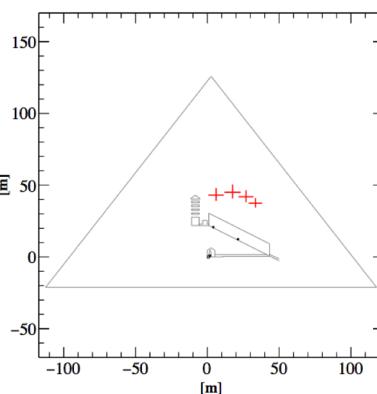
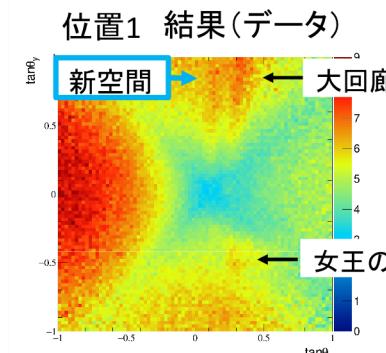


purple: data/sim 1b  
red: data/sim 2  
blue: sim 1b/sim 2



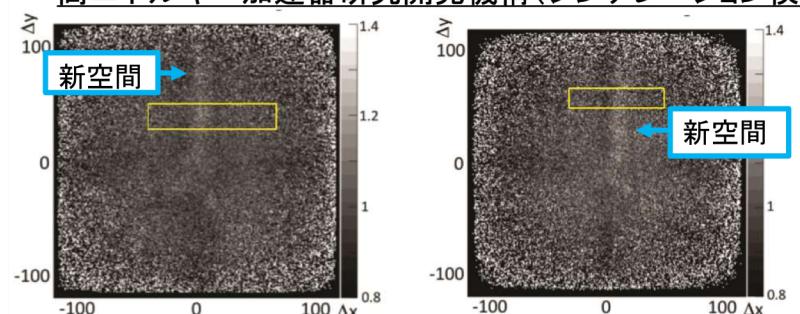
# 名古屋大学と高エネ研の観測結果のまとめ

## 名古屋大学(原子核乾板)



全長30m,  
大回廊の上部、  
断面は大回廊に匹敵

## 高エネルギー加速器研究開発機構(シンチレーション検出器)



大回廊の上部に新空  
間を検出。  
名古屋大学の結果と  
矛盾しない結果を得た。

名古屋大学  
記者発表資料

Sigeru Odaka, KEK

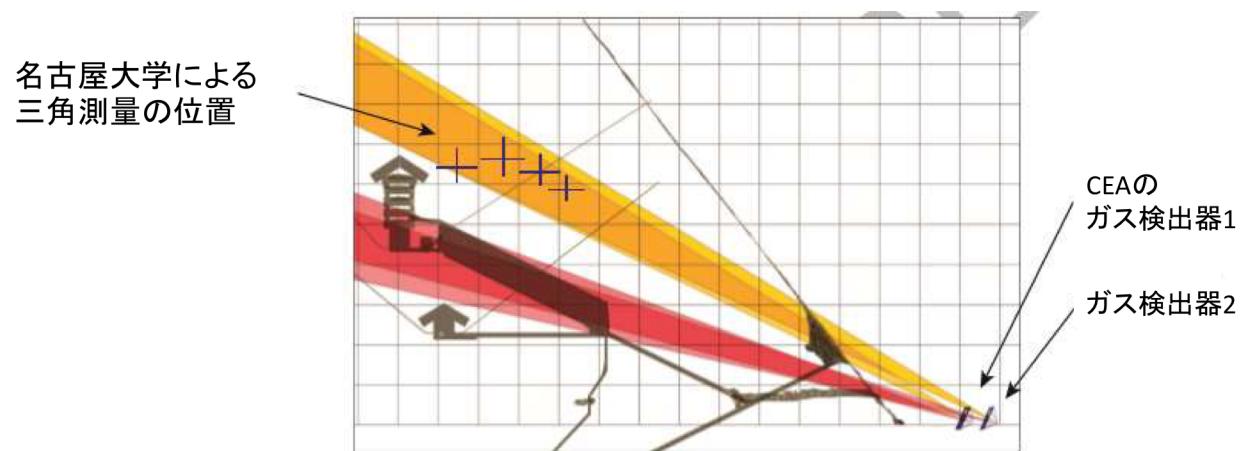


名古屋大学  
KEK  
NHKのメンバー

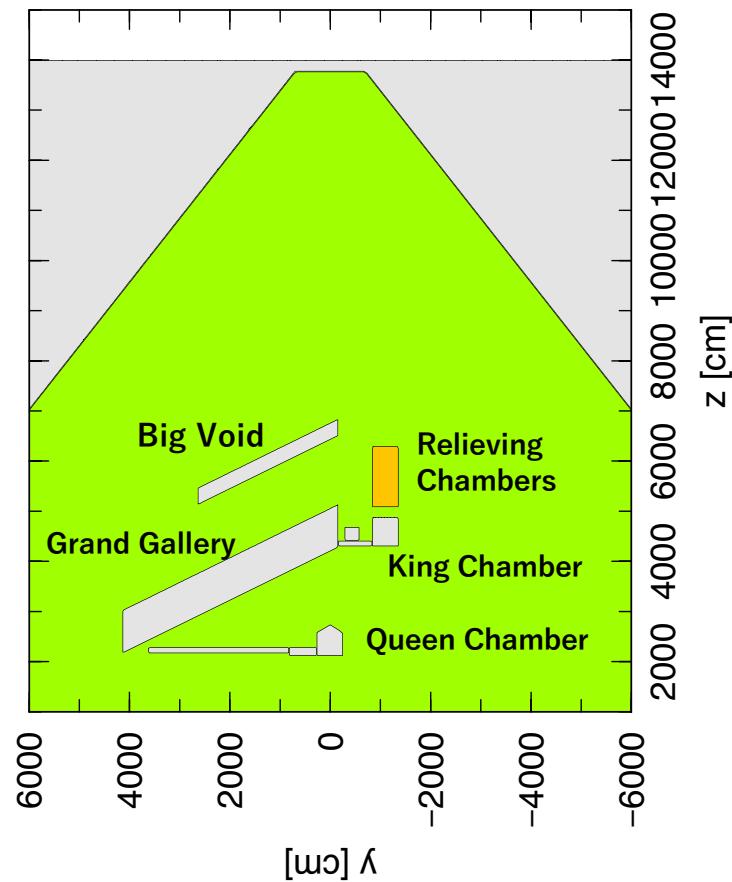
2017年1月 NHK

## CEA(フランス)による再確認

- ・名古屋大学の位置を元にガス検出器をピラミッドの外側に設置
- ・大回廊を確認(赤の領域)
- ・名古屋大学と高エネ研の結果(新空間)を確認(オレンジの領域)



名古屋大学  
記者発表資料

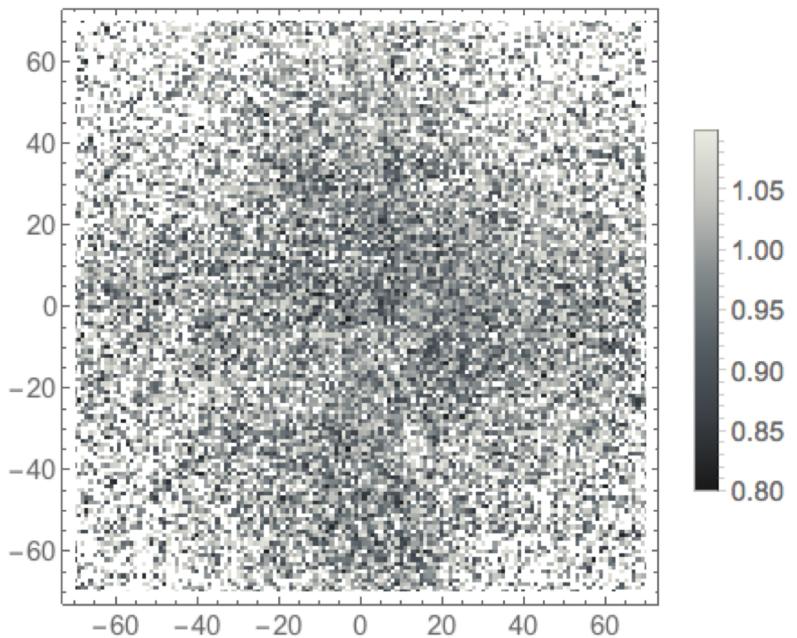


Big Voidを入れたsimulation 1aと比較

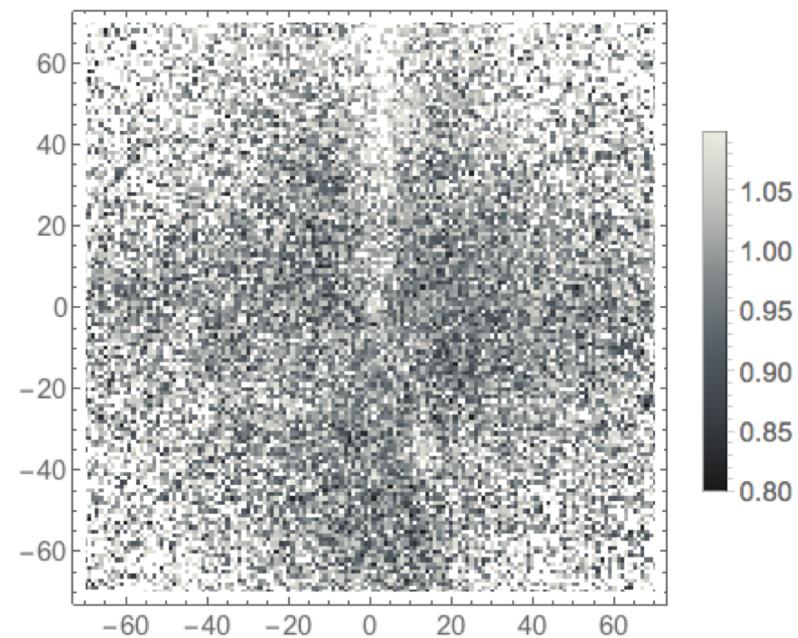
ただし、空間が水平か、  
大回廊と平行かについては未定。  
ここでは、平行と仮定している。

**pos1**

**data/sim1a**



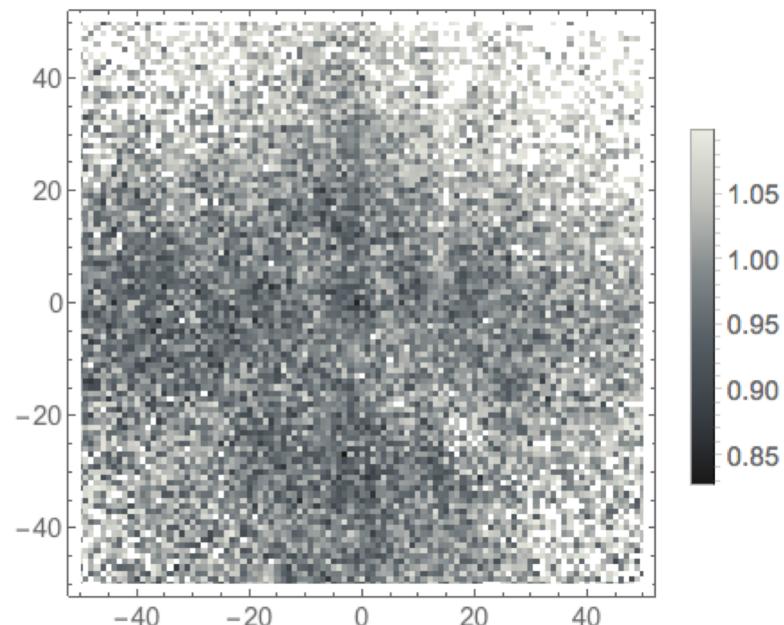
**data/sim1b**



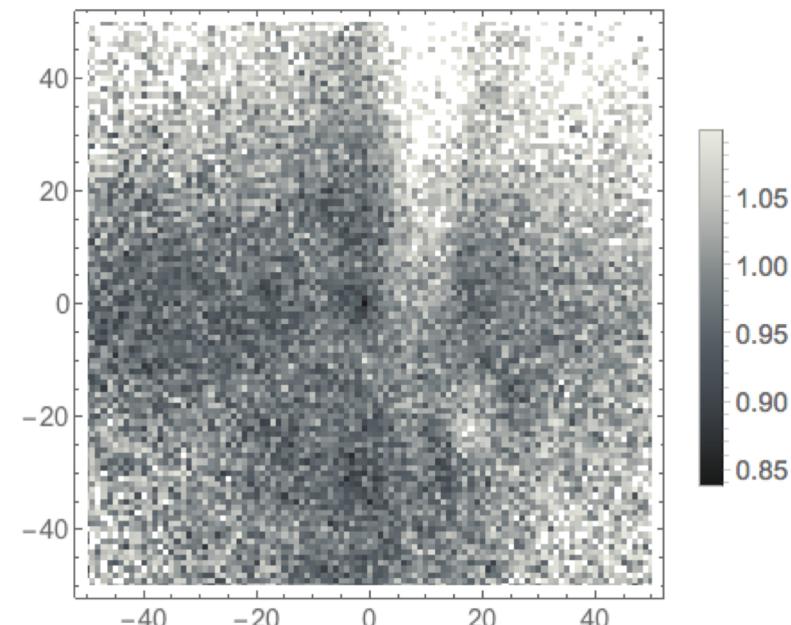
**Big Voidを入れたsimulation**

**pos2**

**data/sim1a**



**data/sim1b**



**Hotel  
Mena House**

























# Hotel Guide

## 英語



### QUICK GUIDE

- Hotel Telephone Number +202.33.77.3222
- Hotel Fax Number +202.33.76.7777
- Country Code +20
- Room-to-Room 7+room number
- Local calls within Cairo dial 9+number
- National calls within Egypt dial 9+0+city code+number

- Long distance calls  
dial 9+00+country code +area code+number

For information on telephone charges please call **At Your Service®**.

### DO NOT DISTURB

A piece of quiet. We're happy to hold all your calls. Please call **At Your Service®** to make a request.

### VOICE MAIL

Press "Message" or call extension 6800.

For your convenience, the phone in your room provides you with a private voice-mail box. The red light on your phone will be lit if you have messages waiting. All of your messages will be time-stamped and remain in your mailbox until you check out or delete them. If you'd like, you may record a personalized greeting on the system by following the voice-recorded instructions. When you delete a message, it is removed completely from the system.

### To retrieve your messages

Lift the handset, press "Message" or call extension 6800.

### HIGH-SPEED INTERNET CONNECTION

Stay connected to what's going on at home and the office with high-speed Internet access.

### WIRELESS INTERNET ACCESS

#### INSTRUCTIONS:

Step 1: Ensure your wireless option on your device is enabled or turned on.

Step 2: Connect to the Marriott\_Guest wireless network.

Step 3: The login screen will automatically pop up.

Step 4: If the login screen didn't pop up, please open your Internet Explorer, Firefox or Safari and go to any site e.g. [www.marriottwifi.com](http://www.marriottwifi.com) and the login screen will appear.

Step 5: Please choose between free internet or a higher speed for an additional cost of 150 LE.

You are now connected and will be directed to the hotel home page.



### إنترنت فائق السرعة

ابق على اتصال مع ما يحدث في منزلك أو في مكتبك مع إنترنت فائق السرعة.

### تعليمات الاتصال بشبكة الإنترنط اللاسلكية

- ١ - تأكد من تشغيل خيار الشبكة اللاسلكية على جهازك.
- ٢ - اتصل بشبكة الواي فاي، التي تحمل اسم:

Marriott guest

- ٣ - سوف تظهر شاشة الترتيب وتسجيل الدخول.
- ٤ - إذا لم تظهر شاشة تسجيل الدخول، يرجى فتح المتصفح للإنترنت سواء كان إنترنت إكسplورر أو فايرفوكس، أو سفاري، أو متصفح آخر له اذهب إلى أي موقع لaptopsolution ميل: [www.marriotttwifi.com](http://www.marriotttwifi.com)
- ٥ - يرجى الضغط على زر الإنترنط المحماني أو خدمة الإنترنط السريع مقابل ١٥، حيثما مصاريف إضافية.

أنت الان متصل بشبكة الإنترنط وسوف يتم توجيهك إلى الصفحة الرئيسية للإنترنت.

### الدليل السريع

+٩٦٣ ٧٧٣٤٤٤٠ +٩٦٣ ٧٧٧٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٨٦٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧

+٩٦٣ ٩٧٧٧٧٧



表紙

アラビア語

英語

アラビア語

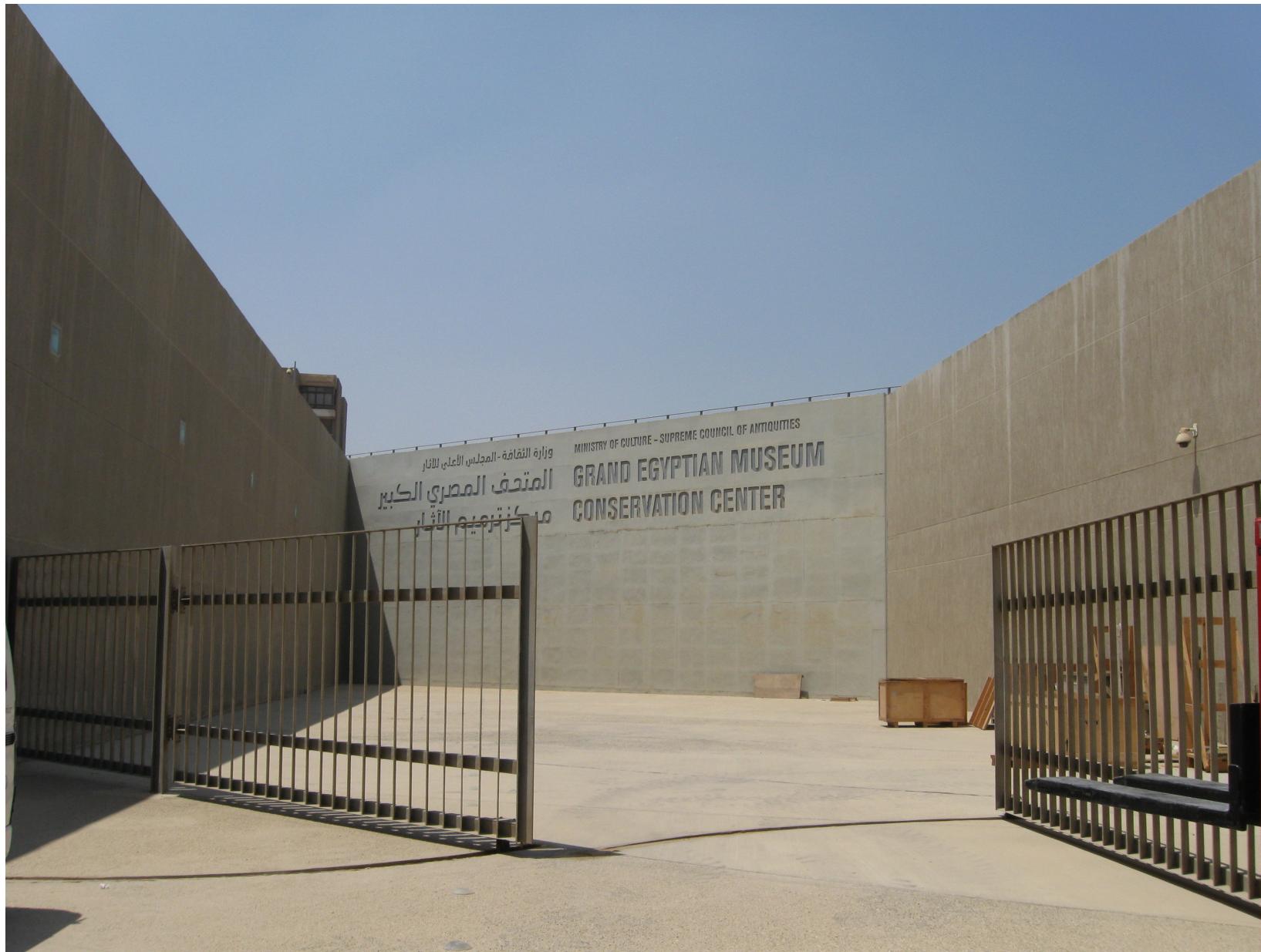
英語

中心のページ

全体が左右対称



GEM





化粧石







CEAの検出器テント

カイロ博物館

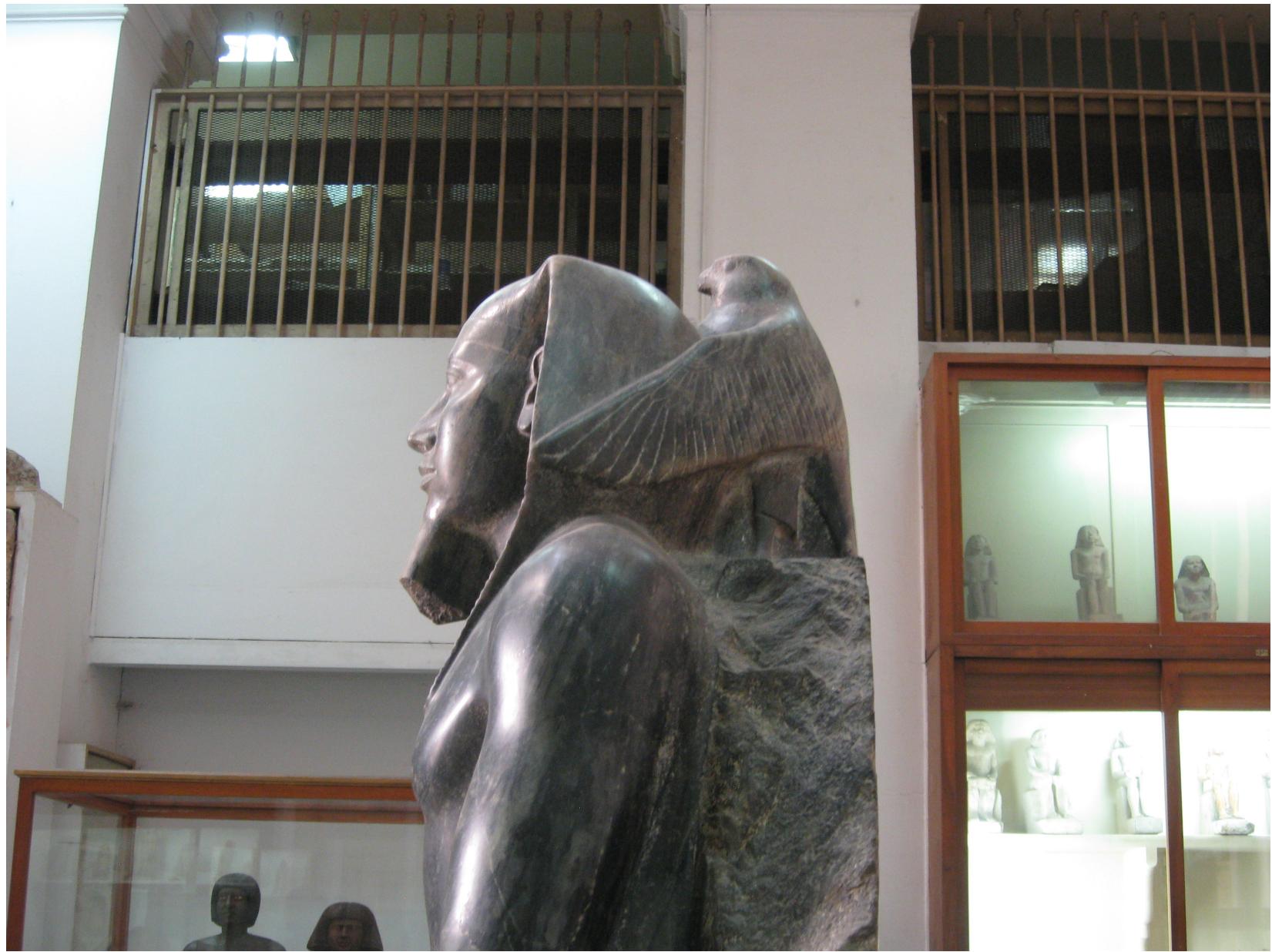








カフラー王



クフ王





地下の間への通路入り口

地下の間





地下の間

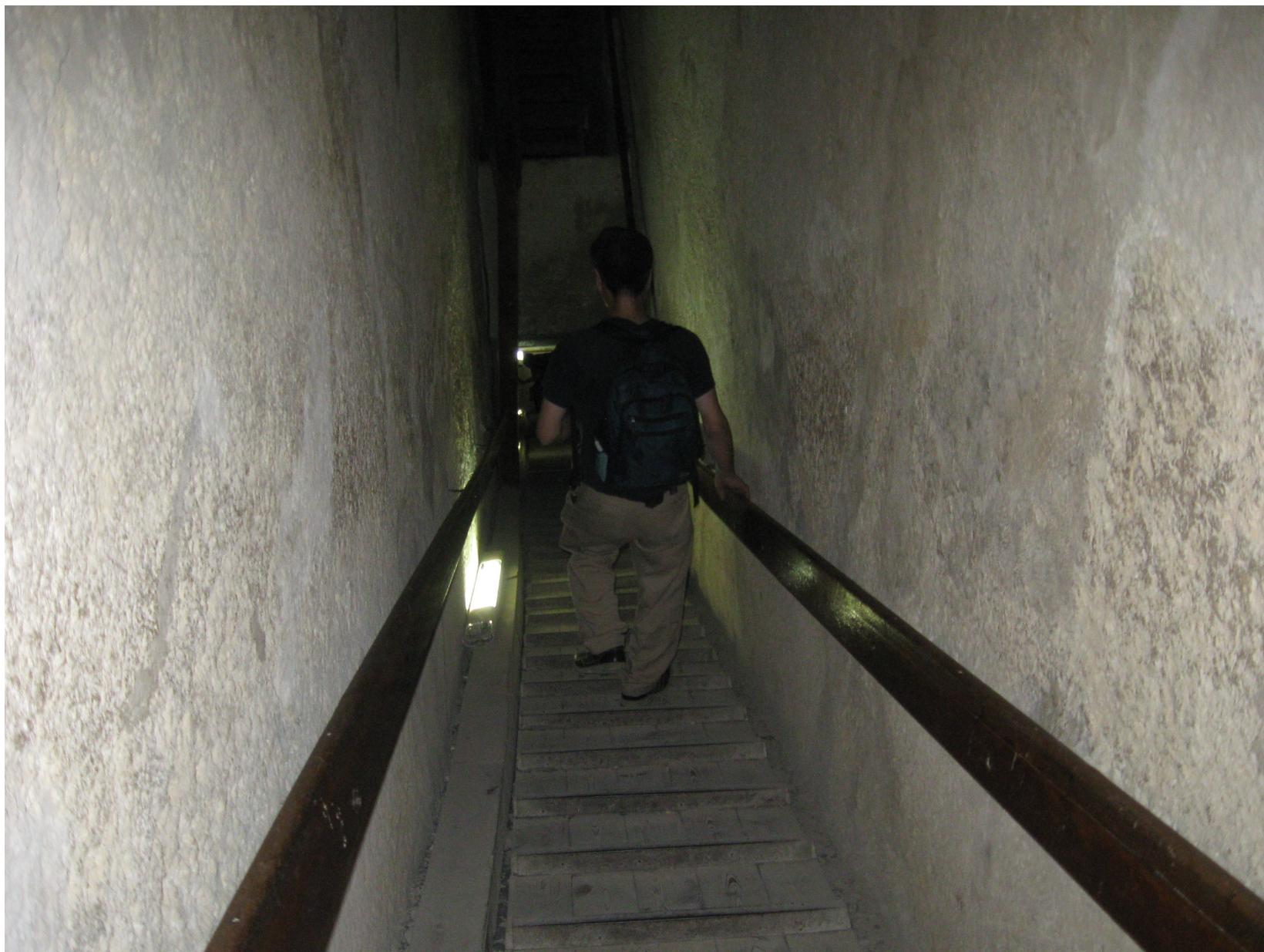


カフラー王ピラミッドの下見





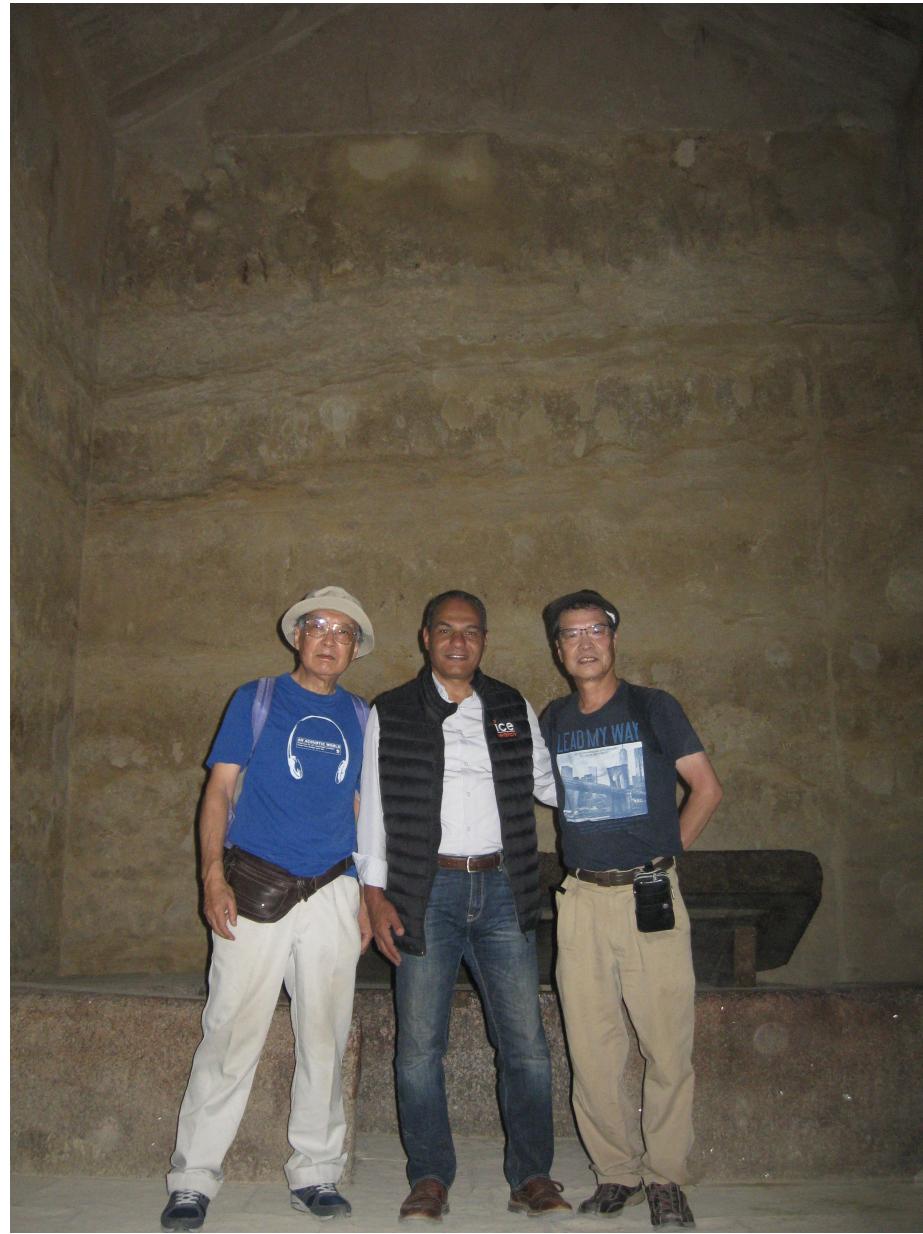








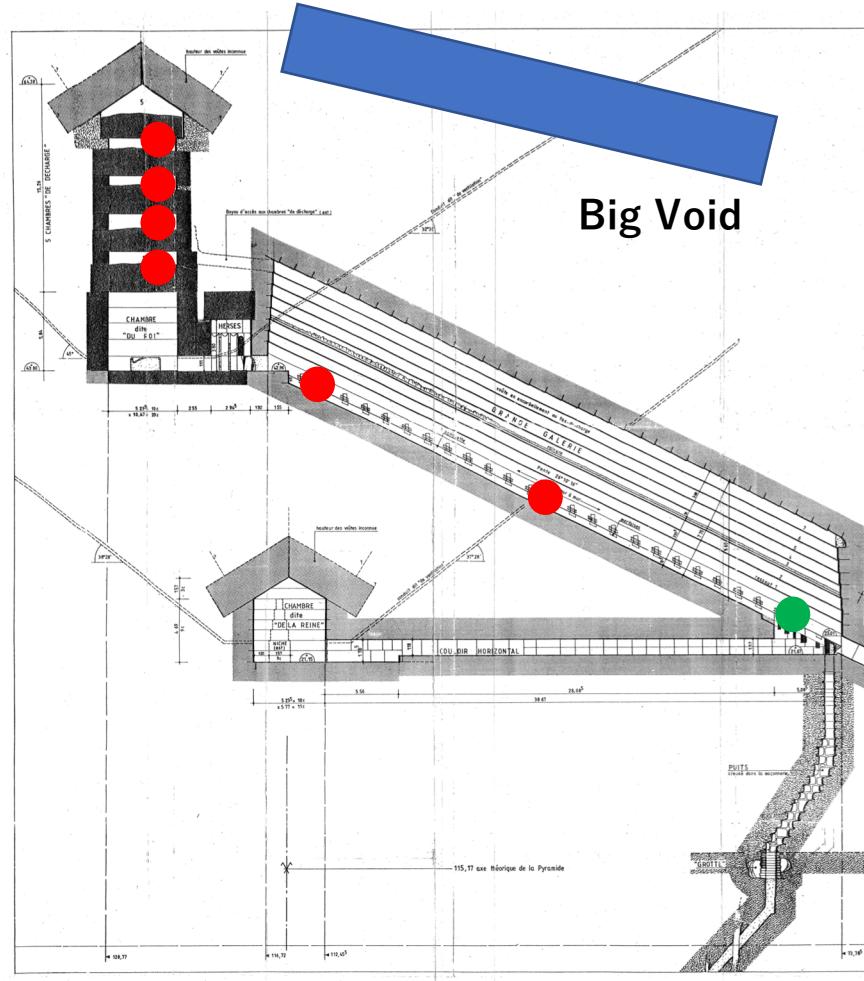
Belzoni. 2. Mar. 1818.



ベルゾーニ チェンバー

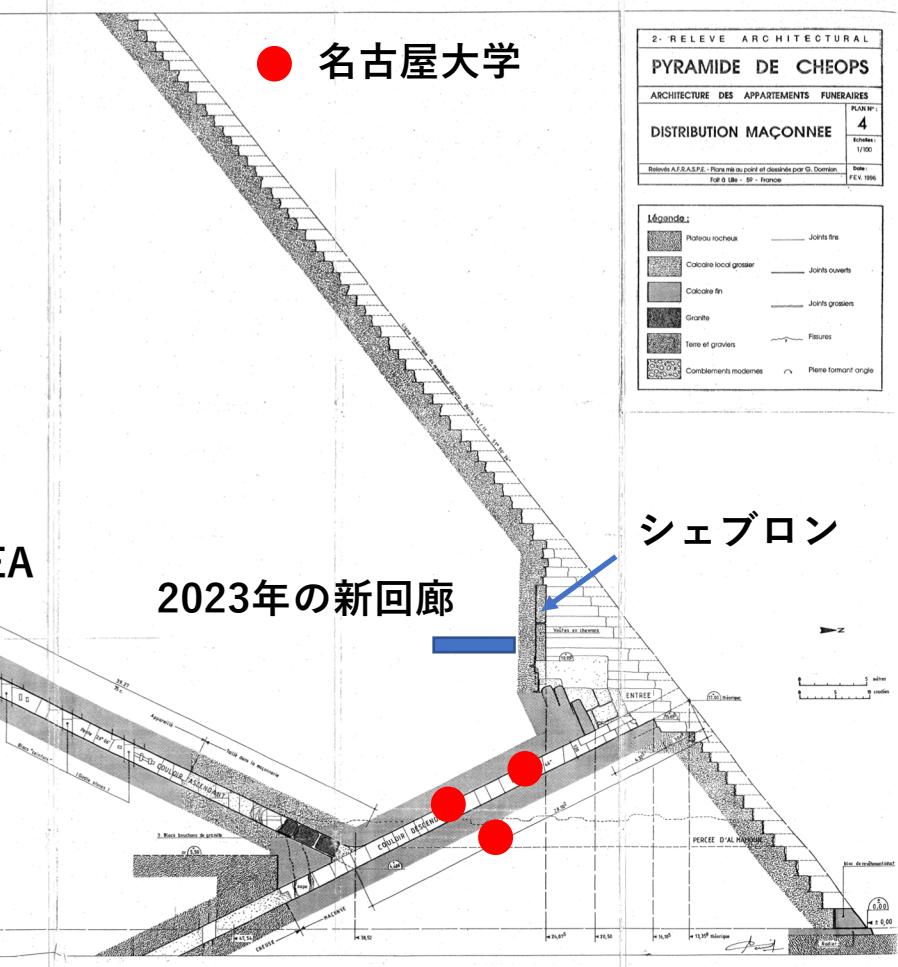
# ScanPyramidsその後の活動

- Big Voidの詳細な調査。
  - 直下の大回廊に検出器を設置。 (名古屋大学、CEA)
  - 重量軽減の間に検出器を設置。 (名古屋大学)  
未だに水平か、平行かは不明。
- 正式な入り口上部のシェブロンの奥の調査。 (名古屋大学)  
水平な回廊の存在を示し、今年さらに光ファイバー撮影  
によって実証。
- 地下の間に検出器を設置。測定は終了。 (名古屋大学、KEK)  
女王の間付近より下に未知の構造があるか。解析を継続中。
- カフラー王のピラミッドに検出器を設置、現在は測定中。  
(名古屋大学、KEK, CEA)



## Big Void

CEA



名古屋大学

シェブロン





岩の隙間にファイバーを通す

正式な入り口

by Kouhei HAYASHI



地下の間へ設置

by Kouhei HAYASHI

カフラー王ピラミッド  
ベルゾーニ チェンバー

by Kouhei HAYASHI





カフラー王ピラミッド  
ベルゾーニ チェンバー

by Kouhei HAYASHI

# KEKシンチレータ検出器の課題

- 黒十字

検出効率が入射角に依存しているように見える。

検出面に垂直に入射するとシンチレータの隙間では不感になる。

通常のビームラインでは、ビームの角度広がりが小さくて問題にならない。

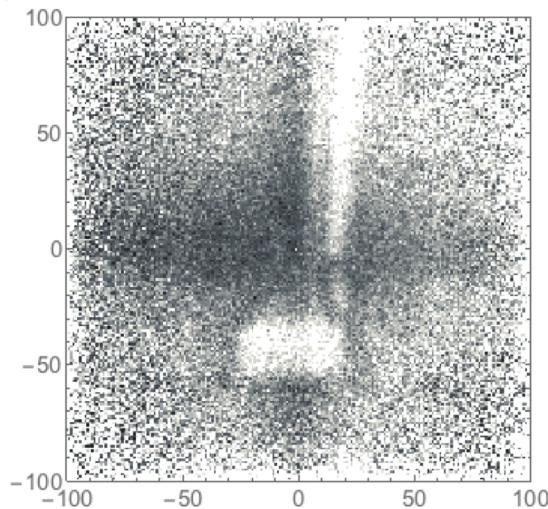
ミュオン透視では角度に依存した補正が必要であるが、  
依存する原因是まだ十分には理解されていない。

- データ回収

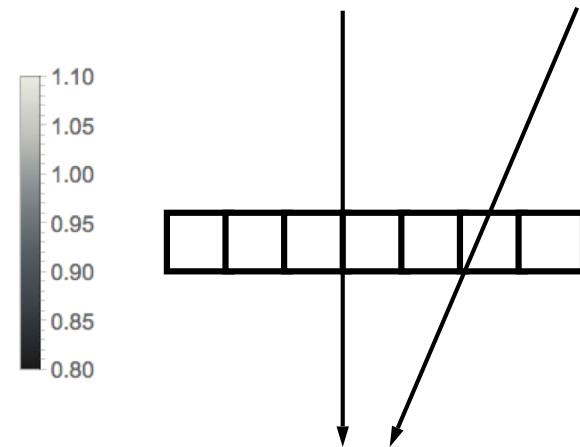
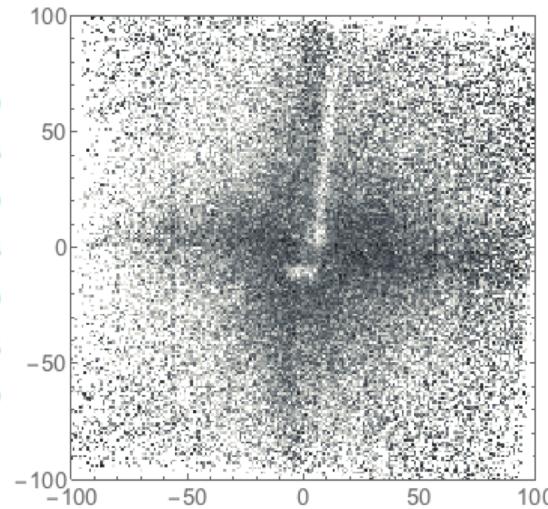
PCに蓄積したデータを現場で人がUSBメモリーへコピーして、  
KEKへ転送している。携帯電話の回線を利用できないか。

## 黒十字の影響

pos 2, data/sim 2



pos 3, data/sim 2



地下の間

## 謝辞

KEKでのミュオン透視を主導しています、高崎史彦 元理事と、  
私をこの計画への参加を促しました、神谷 幸秀 元理事に感謝しております。

PHITS simulationでの長時間の計算機使用を提供していただいた、  
多和田正文氏と、森田昭夫氏に感謝しております。

今回の夜話で発表の機会を与えてくれました、  
増澤美佳 校長に感謝しております。