

10. 宇宙線ミュオンによるピラミッド探索

高エネルギー加速器研究機構

佐藤 康太郎

目 次

宇宙線ミュオンによるピラミッド探索

1 はじめに	10-1
2 プラスチックシンチレータ検出装置	10-1
3 検出方法	10-2
4 データ回収	10-2
5 検出装置の設置	10-2
6 データ解析	10-2
7 その後の測定	10-5
謝辞	10-5

宇宙線ミュオンによるピラミッド探索

1. はじめに

KEK は 3.11 により被害を受けた福島第一原発の炉心溶融の状況の手がかりを、東京電力との共同研究でミュオン透視を使って調べていました。このことにより KEK がピラミッドの透視に参加することになったのではないかと考えられます。

これまで、ピラミッドの‘科学調査’と称して色々と行われていたのですが、考古学の専門家にとって期待された結果が得られなかったようです。それで、ピラミッドの考古学専門家には、‘科学調査’は信用されていなかったらしいのです。

ミュオン透視によってピラミッド内部を調査するという計画が NHK 関係者により提案されました。名古屋大学には、原子核乾板を用いた素粒子実験の森島グループがあり、狭いところにも乾板を置くことができるので、原子核乾板を用いたミュオン検出法が考古学調査には有効であろうということで、名古屋大学が選ばれたようです。名古屋大学もすでに福島第一原発でミュオン透視測定を行なっています。また、ピラミッドを調査する許可を得るのは難しく、エジプトの機関との交渉と測定を含めてフランス原子力庁(CEA)が参加しました。ナポレオンが大規模な科学調査隊を最初にエジプトに派遣し、膨大な資料を持ち帰ったことから、フランスは古代エジプトへの関心が特に高い国です。

考古学の世界では、‘科学調査’というものはこれまでの経緯からあまり信用されていないようです。私たちにはミュオン透視は方法論的には完成されていて、結果には全く疑問の余地はありません。このような考古学世界の状況を変えるために、複数のグループが独立に別々の方法でミュオン透視と解析を行なって、結果を持ち寄り互いに比較し、一般の人にも信頼できる説得力のある結論を得ようという Scan Pyramid 計画が立てられ、KEK も NHK との共同研究として参加しました。名古屋大学は原子核乾板を、KEK はプラスチックシンチレータを、CEA はワイヤーチェンバーを用います。

2. プラスチックシンチレータ検出装置

ここからは主に、KEK についての話になります。検出器の設計は、すでに使用実績のある、原子炉のミュオン透視でも使われた検出器を基本にして行われました。重要な課題は、いかにして検出面積の大きな検出器を作り、ピラミッドの狭い通路を人力で搬入し、さらに現場の設置作業をどうやって簡略化するか、ということでした。最終的には、検出器ユニットを二つ折りにすることによって、1.2m 平方の面積が可能となり、しかもなんと二人で運べる重さの 60kg におさめました。検出器は市販のアルミチャンネルで構成されたフレームで支持されていて、検出装置の総重量は約 400kg になります。

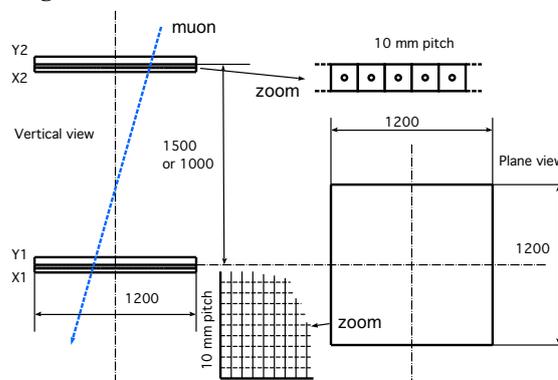


Fig. 1 一つのミュオン検出ユニットは 1.2m 平方で、幅 1cm のシンチレータバー 120 本で構成されている。バーの中心の穴には波長変換のファイバーがあって、光をバーの端部にある MPPC まで伝える。バーが直角する二つのユニットを組み合わせた検出器を 2 セット上下に離して設置することによって、ミュオンの方向を測定できる。

ミュオンの検出ユニットの大きさは 1.2m の正方形で、長さ 1.2m、幅 10mm のプラスチックシンチレータ 120 本が密接して並べられています (Fig. 1)。この検出ユニット 2 台を互いにシンチレータの向きが直角するように重ねたひと組を用いると、ミュオンが通過した位置(x1, y1、実際には hit したシンチレータのチャンネル番号)をまず測定できます。同様なもうひと組の検出器を 1m ほどの距離を離して設置しその位置(x2, y2)を測定します。4 個の検出ユニットでの位置(x1, y1, x2, y2)を同時に測定できたミュオンの情報から、ミュオンの進行方向を測定できます。

ここでのミュオン透視は本質的には針穴写真機と同じで、ミュオンの進行方向で bin 分けされた事象数の分布のみが情報になります。

3. 検出方法

シンチレータの断面は 10mm の正方形で、中心に穴が空いていてその中を波長変換の機能を持ったファイバーが通っています。シンチレーション光はファイバーによって棒状シンチレータ端部にある MPPC(Multi-Pixel Photon Counter, Hamamatsu Photonics)まで運ばれ、電気信号となります。DAQ Box は MPPC に給電するとともに、hit したチャンネル番号とパルス信号の到達時間を PC へ送ります。MPPC は信号レベルの温度依存性が大きく、一般的には環境温度によって MPPC へのバイアス電圧を変えて、信号レベルを調節する必要がありますが、ピラミッドの内部では幸いにも温度変化がほとんどなく、MPPC には良好な環境です。

4. データ回収

DAQ Box のデータは現場に置かれたノート PC に全て蓄積されます。データ回収は契約した現地の人に依頼し、現場に入ってまず PC から USB メモリーへデータをコピーし、その後契約した人の使用可能なネットワークで KEK へ送るということにしました。データ転送の頻度は状況により、月毎程度から数ヶ月毎まで変化しました。

5. 検出装置の設置

簡単に、クフ王のピラミッドの内部構造を述べてみます。大きな空間は、王の間、女王の間、地下の間、と呼ばれる三つがあり、どこにも KEK 検出器の設置は可能です(Fig. 2)。三つの大きな空間は、上昇通路、大回廊、下降通路などの通路で繋がっています。よく知られているように、ピラミッドは正確に東西南北を向いていて正式な入り口は北面にあります。興味深いことに、全ての通路は南北方向を向いていて、中心より東側に 7.2m ずれた鉛直面上に全てあります。東西方向に大きく離れた二つの位置からミュオン透視が不可能であり、ピラミッド内部を透視して三角測量をする際に困難が予想されます。

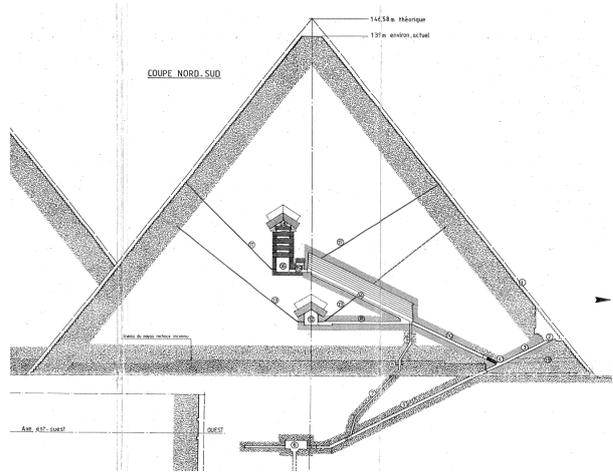


Fig. 2 クフ王のピラミッドを東側から見た断面図で、上から、王の間、女王の間、地下の間、の3つの大空間がある。不思議なことに、大回廊を含め全ての通路はピラミッドの中心から東側に 7.2m ずれた南北方向の鉛直面上にある。

名古屋大学と KEK のミュオン透視検出器は、女王の間に置かれることになりました。ピラミッドの一般観光客への公開は王の間と女王の間のどちらか一つが交代で行われているのですが、測定の間は観光客の立ち入りは禁止されていました。KEK が設置した時にはすでに名古屋大学は測定を開始していて、すでに最初の解析結果が得られていたようです。

KEK 測定装置の機材は、現地の作業員によって運搬され、最初は大回廊の真下になる位置に設置されました。その後三角測量が可能になるように、装置は西の方向に約 3m 移動されました。結局、KEK は女王の間の中の 2 カ所からミュオン透視を行いました。名古屋大学は原子核乾板の機動性を生かし、女王の間の横穴を含め可能な範囲に乾板を設置しました。

6. データ解析

4 層の検出ユニット(x1, y1, x2, y2)を同時に通過した事象を選び、進行方向を表す 2 次元で bin 分けして事象数を蓄積したものが解析の元となります。最初の測定位置では、上下の検出器の距離は 1.5m で、bin あたりの角度 (正しくは tangent) は 6.7mrad で、2 番目の測定位置では距離は 1m で 10mrad となり、これらは角度分解能の目安となります。

最初の位置(Pos. 1)での観測は、2016 年 8 月から、2017 年 1 月まで行われ、この間のデータ取得実日数は 158 日で得られた事象数は 4.8 M で

した。解析では、bin 分けされた測定データと、ある宇宙線ミュオン分布モデルをミュオン源としてシミュレーション(PHITS)で得られる検出器での期待値を比較します。シミュレーションでは、ピラミッドの内部構造をいろいろと変えて行い、ピラミッドのモデル及び解析方法の改良を行います。

ここで、ミュオンの方向を 2 次元 bin 分けにした事象数の無補正のデータを白黒のヒストグラム画像として示します(Fig. 3)。水平軸は東西方向の傾きを表し、垂直軸は南北方向で、北を上方とした通常の地図表示と同様にピラミッドを上から見ていることになっています。数値は上下の検出器のチャンネルの差(-120 ~ +120)を角度の表示として代用しています。ピラミッドの稜線に沿って岩石の量が多いので、事象数が少なく暗く見えています。実は測定器を運搬する際に複数のコネクタが破損し、不動作のチャンネルが発生しました。このことにより、この画像では横方向に目障りな縞が見えますが、この後の解析では補正しています。

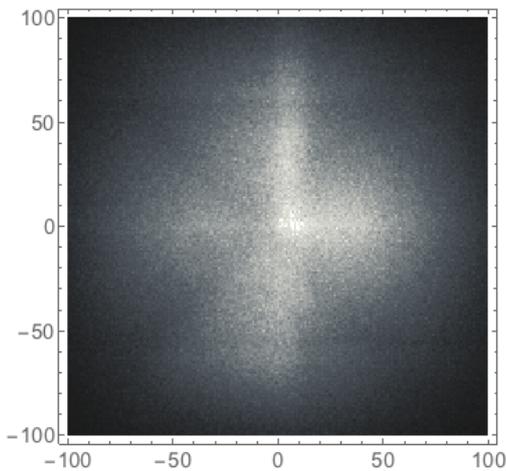


Fig. 3 二次元進行方向で bin 分けした Pos. 1 全事象のヒストグラムで、横軸は東西方向、縦軸は南北方向となっていて、上方が北の通常の地図と同じである。座標軸の数値は上下の検出器でのシンチレーターのチャンネル番号の差を表示している。中心(天頂)に向かって宇宙線が多く、またピラミッドの稜線方向に事象数が減っている。一部の MPPC が不動作となり、 $Y = \pm 60$ あたりにわずかな縞が見えている。

既知の内部構造が測定データからどのように見えるはずであるかをシミュレーションで確認してみます。これには、内部構造を入れたシミュレーション結果を構造がない場合のシミュレーション

で割り算をして規格化します。その結果を示します(Fig. 4)。

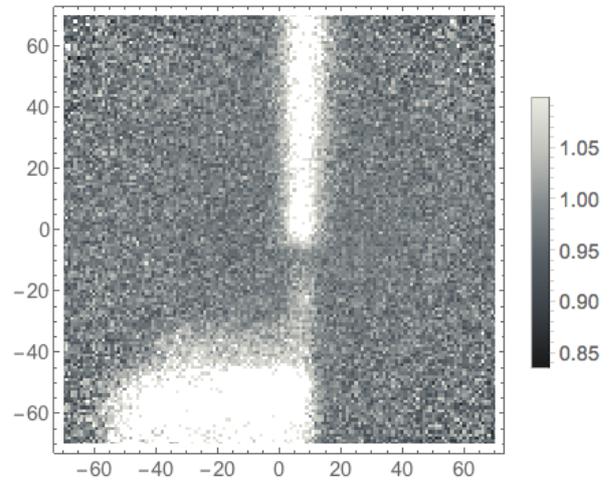


Fig. 4 既知の内部構造を入れたシミュレーション結果を、構造を入れないもので規格化した画像で、王の間、大回廊、それらの間の通路が見えている。

いよいよ、測定データを構造のない場合のシミュレーションで規格化してみます(Fig. 5)。その画像ではピラミッド本体、稜線の影響が消えて、実在している王の間と大回廊がシミュレーションで期待した画像のように見えていて、ミュオン透視が科学的に確立した方法であることを示しています。

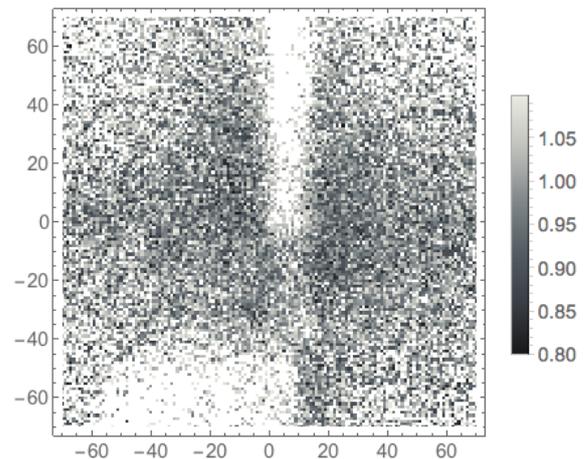


Fig. 5 Pos.1 全事象を内部構造のない場合のシミュレーションで規格化した画像で、大きな構造は Fig. 4 で予想された結果と一致している。

さらに、測定データを、知られている内部構造を入れた場合のシミュレーションと比較したものを示します(Fig. 6)。王の間に対応した部分は消えていて、ピラミッドのモデルと測定が一致して

いることとなります。しかしながら、大回廊の部分についてはまだ明るい部分が残り一致していないように見えます。結果的には、この不一致は大回廊の上部にある大空間(Big Void)によるものであったのですが、解析の最初の段階では、大回廊と大空間が偶然にも東西、南北の両方向で重なっているためにわかりにくくなっていました。

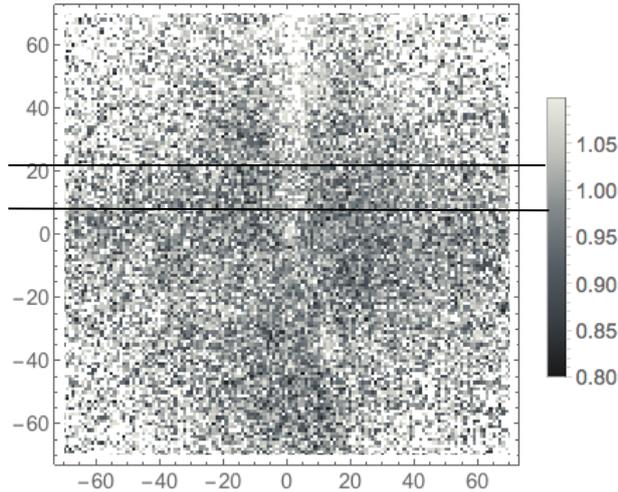


Fig. 6 全事象を既知の内部構造を入れたシミュレーションで規格化した画像で、王の間はほぼ消えていて、ピラミッドのモデルと測定が定量的にも一致している。しかし、大回廊のある部分ではミュオンの増加分が明るく見え、大空間の存在を示唆している。2本の横線の間は後のスライス解析例のデータ位置を示す。

名古屋大学が大空間の位置を三角測量で求め、ほぼ大回廊の上にあるということになって、KEKも三角測量によって位置を確認するために検出器を可能な範囲で西側に約3mずらし、さらに広い角度範囲を観測するために、上下の間隔を1mに減らしました(Pos. 2)。移動後の測定は、2017年1月から2019年11月まで実働で366日間行われ、19.6Mの事象数を集めました。

まず、測定データを、内部構造のない場合のシミュレーションで規格化したものを示します(Fig. 7)。この位置からは、王の間、大回廊の他に、大空間の像が大回廊のそばに見えています。

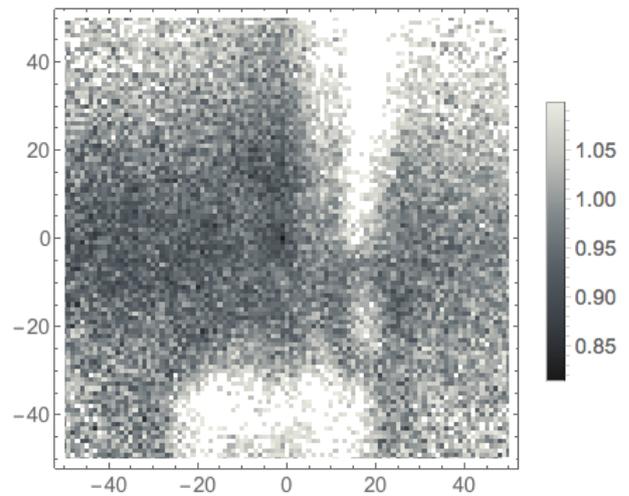


Fig. 7 Pos. 2の全事象を内部構造のないシミュレーションで規格化した画像で、王の間、大回廊の他に、大回廊と平行に大空間が見えている。

さらに、既知の内部構造を入れたシミュレーションで規格化した画像を示すと、ここでは大空間の像が明確に残って見えています(Fig. 8)。もし、未知の空間がさらにはあれば、この画像に見えることとなります。

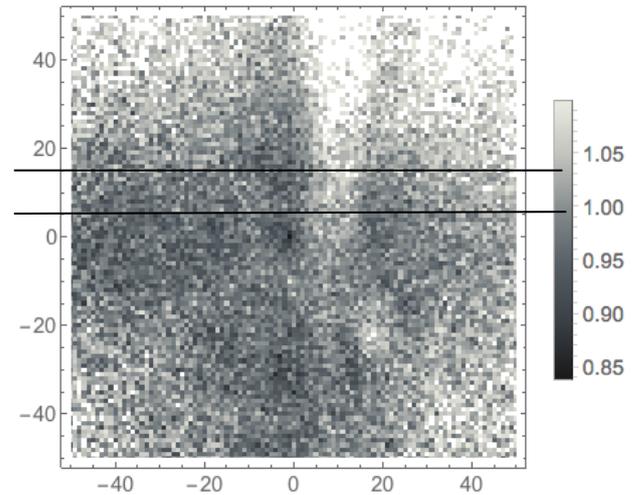


Fig. 8 全事象を既知の内部構造を入れたシミュレーションで規格化した画像で、王の間、大回廊以外に大空間があることを示している。2本の横線の間は後の解析例のデータ位置を示す。

シミュレーションと比較した2次元画像では、構造の有無の手がかりは得られますが、定量的な解析はbin分けした事象数を用いて、一次元のスライス解析をします。一例として、大空間の東西方向の断面を評価するためのスライス像を示します(Fig. 9, 10)。ここでは平均化して統計精度を上げるために、南北(y)方向で複数のbinの事象

数の和を取っています。二つの位置では角度分解能が異なり、それらの位置から見ているスライス像では、大空間のほぼ同じ部分を見るように y 方向の位置と和を取る bin 数を調整しています。また x 方向ではグラフの横軸の角度範囲を一致させてあります。

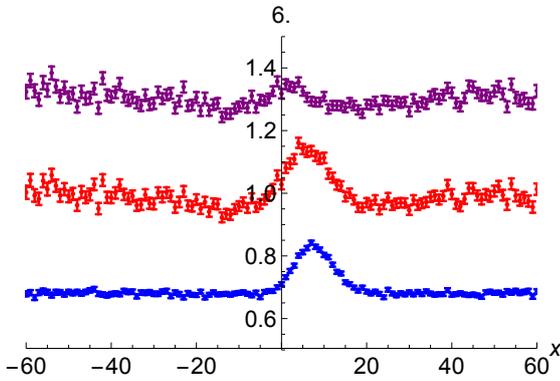


Fig. 9 Pos. 1 で $y=15$ を中心として南北 15 bin の和をとってスライス解析している。下段のグラフは既知の内部構造のあるシミュレーションを内部構造のないシミュレーションで規格化したもの。中段は測定データを内部構造のないシミュレーションで規格化したもの。上段はデータを内部構造のあるシミュレーションで規格化したもので、大空間の断面の方向と大きさを表している。上段と下段のグラフは重ならないように、0.3 上下にずらされている。またグラフのデータ点は平均と標準偏差を示している。

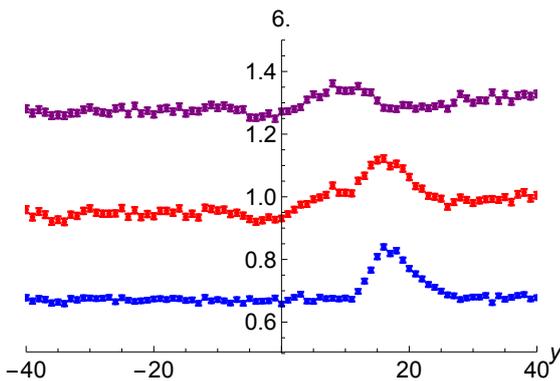


Fig. 10 Pos.2 で $y=10$ を中心として南北 10 bin の和をとったスライス解析を示す。グラフの様式は Fig. 9 と同じである。上段のグラフは大空間の方向と大きさを示している。

これらの解析から、大空間の存在について統計的に有意であることをまず示すことができ、その上で大空間の断面や長さも評価できます。さらに 2 カ所からの視差を使った三角測量により大空間

の高さ位置を評価できます。このようにして得られた結果は名古屋大の結果と矛盾しない、またピラミッドの外部から観測していた CEA のデータにも大空間が見えているということで、この大空間(Big Void)の存在が発表されました(Fig. 11)。

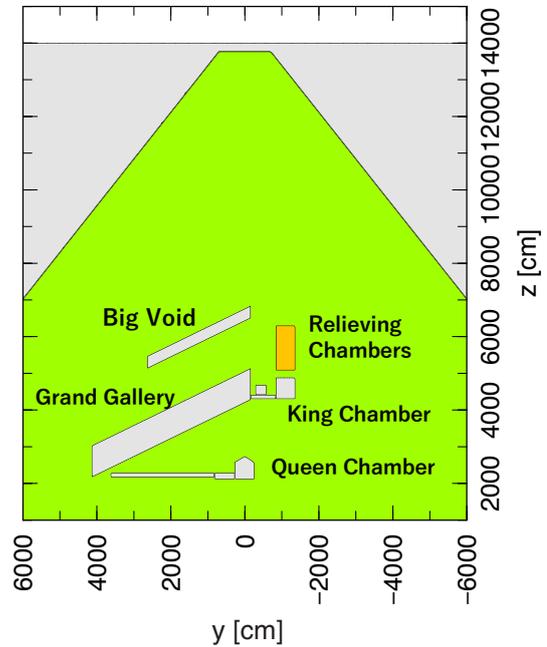


Fig. 11 西側から見たピラミッドの断面で、発見された Big Void の位置を示している。この空間の断面、長さ、位置については評価されているが、傾きは誤差が大きい。ここでは仮に、大回廊と平行として図示してある。

7. その後の測定

女王の間の測定終了後、KEK の測定装置は地下の間に移動し、2018 年 7 月から 2021 年 9 月まで、場所の異なる 2 カ所で、合計 800 日間の観測を行いました。この間、名古屋大学も地下の間でデータ取得を行いました。これらの解析は継続中です。

さらに、2022 年 11 月からは、Scan Pyramid チームはカフラー王のピラミッドへ移動し、KEK も名古屋大学もミュオン透視のデータを取得中です。

謝辞

KEK でのミュオン透視の立ち上げに努力された高崎史彦氏、また私をミュオン透視へ参加するように助言された神谷幸秀氏に感謝を表します。