

Proton ModuleとBaby MINDを用いた解析の現状 および今後の展望

WAGASCI/BabyMIND Experiment

NINJA-WAGASCI joint workshop, 23rd September 2020



Outline



- ◆ Analysis Flows (What is done, what is missing)

- ◆ The strategy to extract cross section

- ◆ Target samples & topologies

- ◆ Response matrix

- ◆ Efficiency, binning studies

- ◆ Systematic uncertainty

- ◆ Open Questions

- ◆ Joint momentum reconstruction

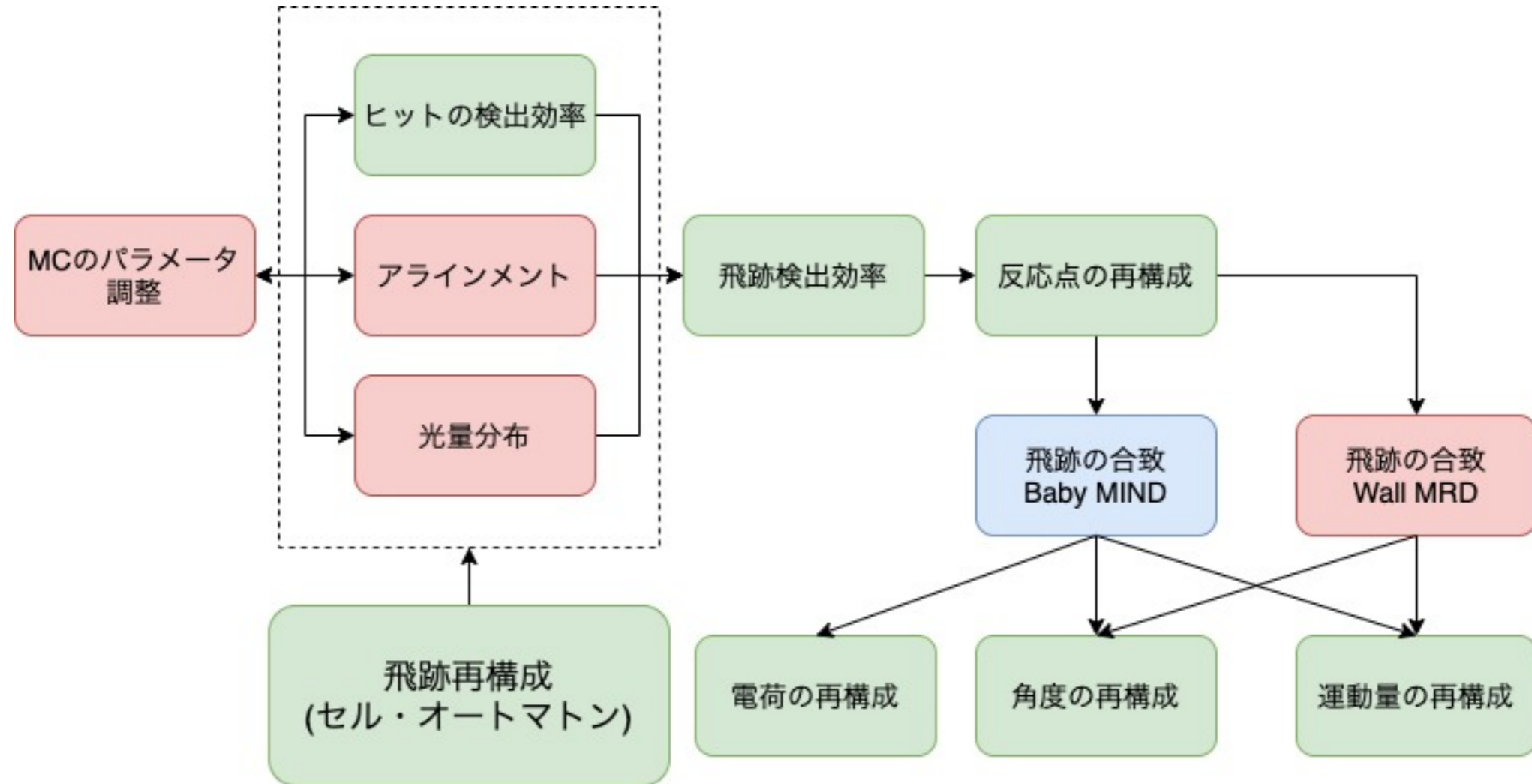
- ◆ Studies on systematic uncertainty at 1.5 degree

解析の現状

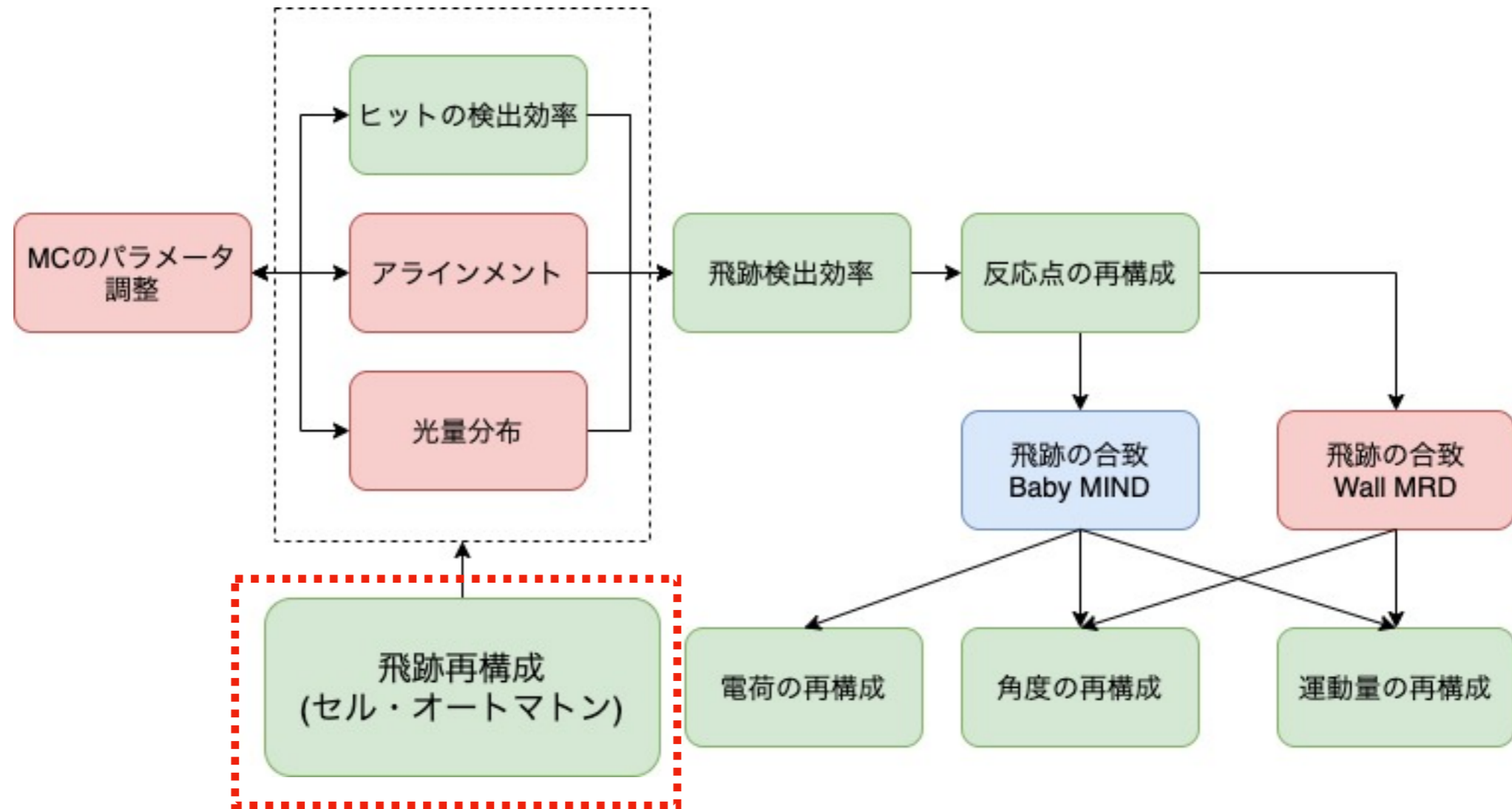
今後の展望

議論したいこと

Analysis Flows



Red	Not done
Green	To be tuned
Blue	Done

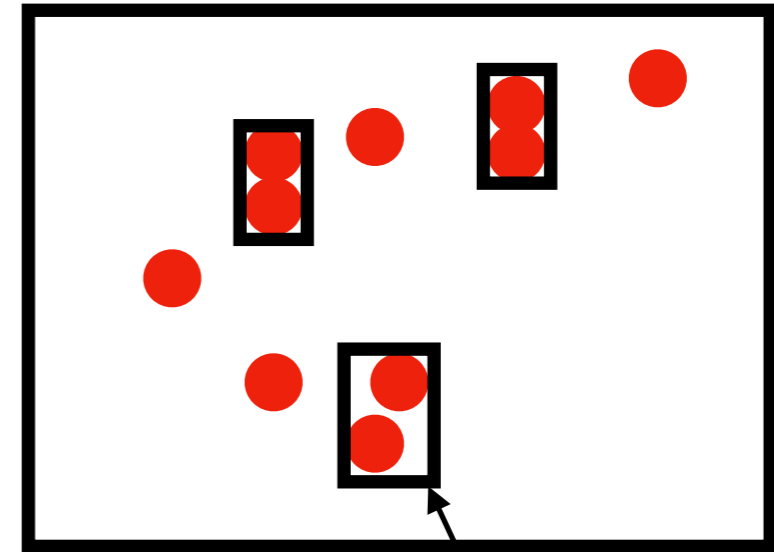
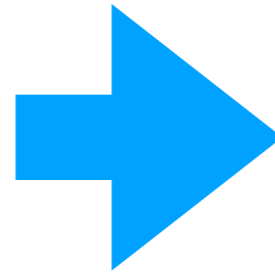
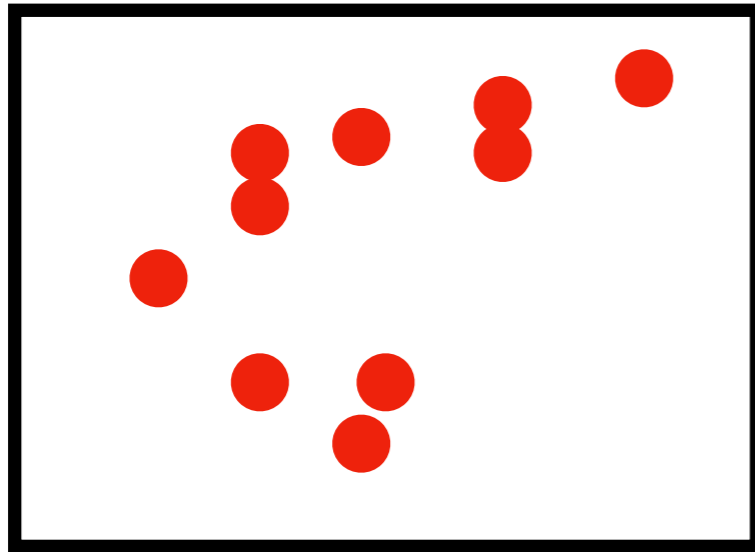


Red	Not done
Green	To be tuned
Blue	Done

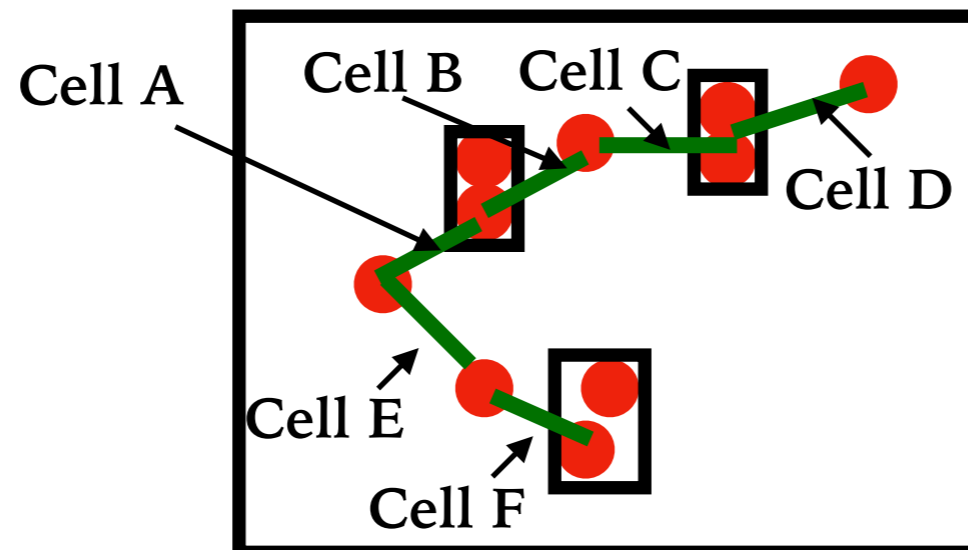
Track Recon 1



1st step (clustering)



2nd step (construction of cells)

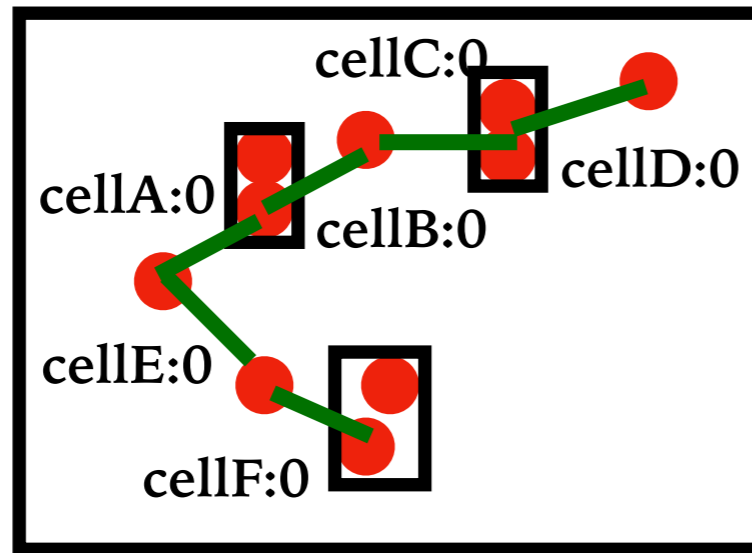


Cluster

Track Recon 2

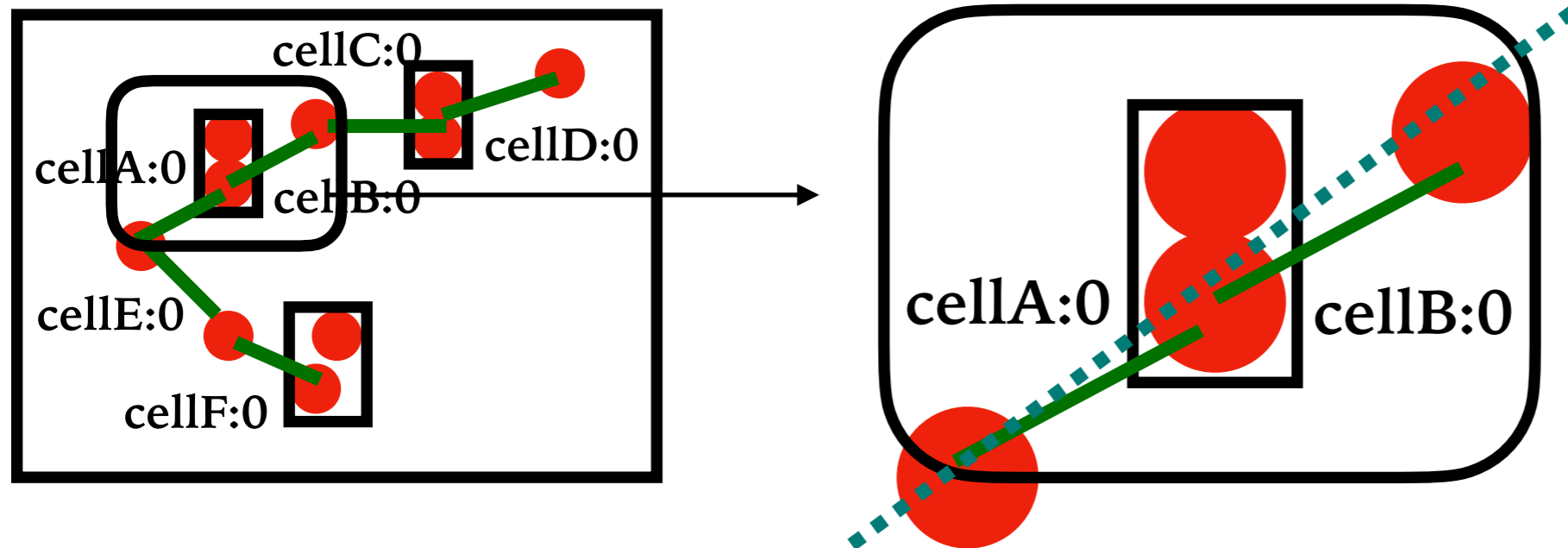


3rd step (Define initial states)



Each cell has state "0" as the initial state.

4th step (Define neighbouring cell)

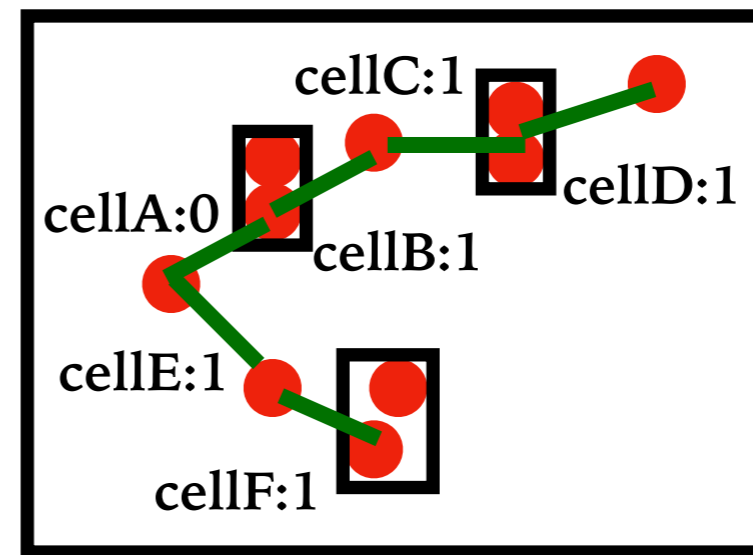
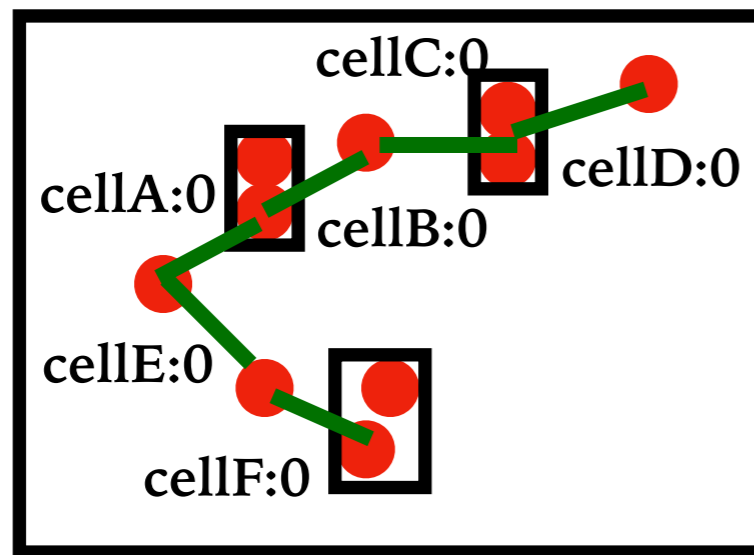


Linear fitting
If the chi-square is **less than 500**, those two cells are defined as neighbouring cells

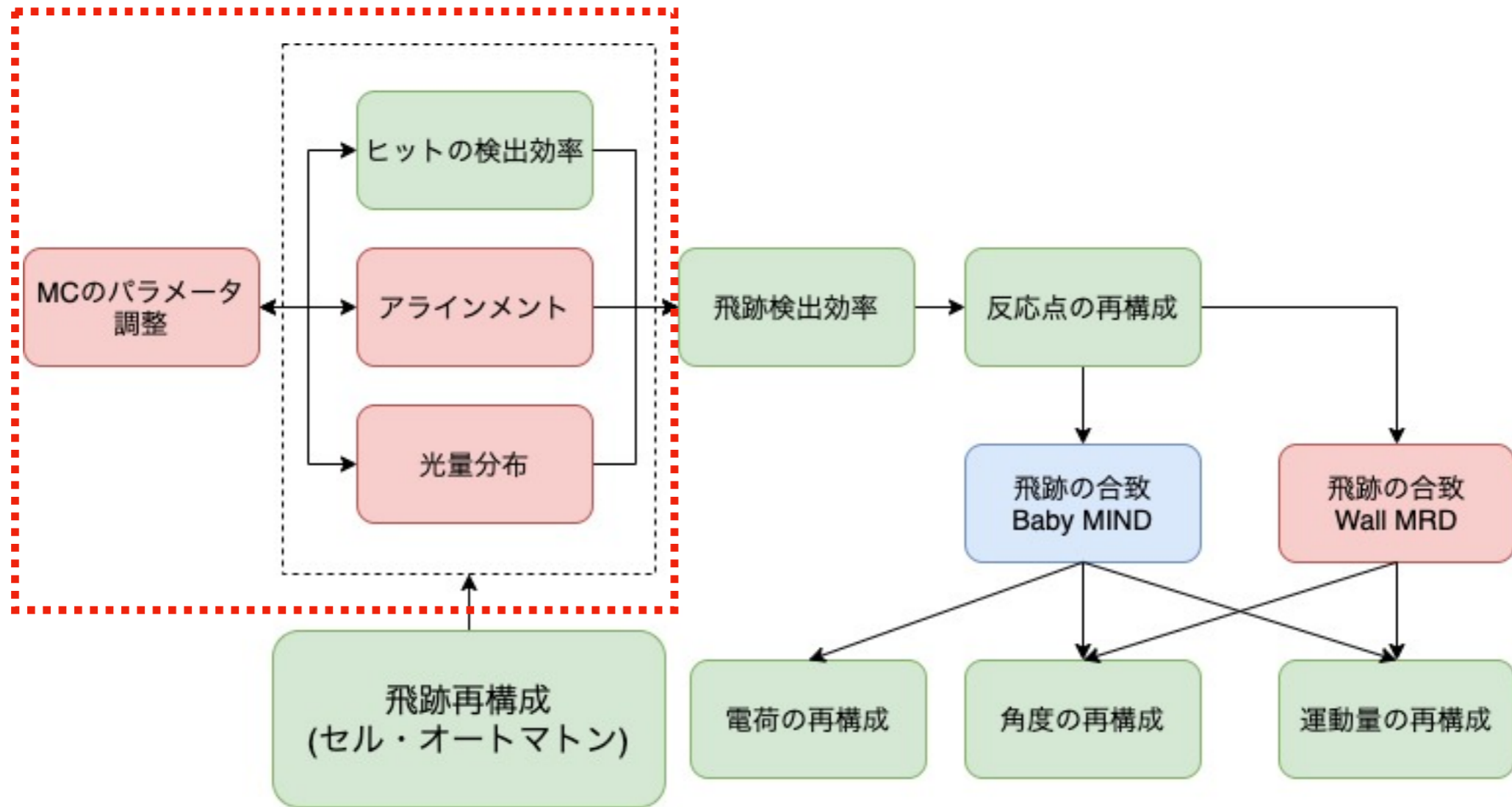
Track Recon 3



5th step (Update states)



- ◆ The state is increased by "1" if the cell is satisfied with...
- ◆ Have an upstream neighboring cell
- ◆ Its state is the same as the state of the upstream neighboring cell
- ◆ This process is finished when the state of no more cell is updated.



Red	Not done
Green	To be tuned
Blue	Done

To be Tuned



MC parameters

1. MPPC characteristics
2. Fiber, Scinti. response

MC hit definition

1. Hit Threshold
2. Coincidence conditions



More serious

◆ Proton Module

◆ Kikawa-san's tuning

◆ WAGASCI Modules

◆ Koga-san's tuning

◆ Wall MRDs + Baby MIND

◆ Same as proton's module

Nice matching between Data & MC (from previous experiment)

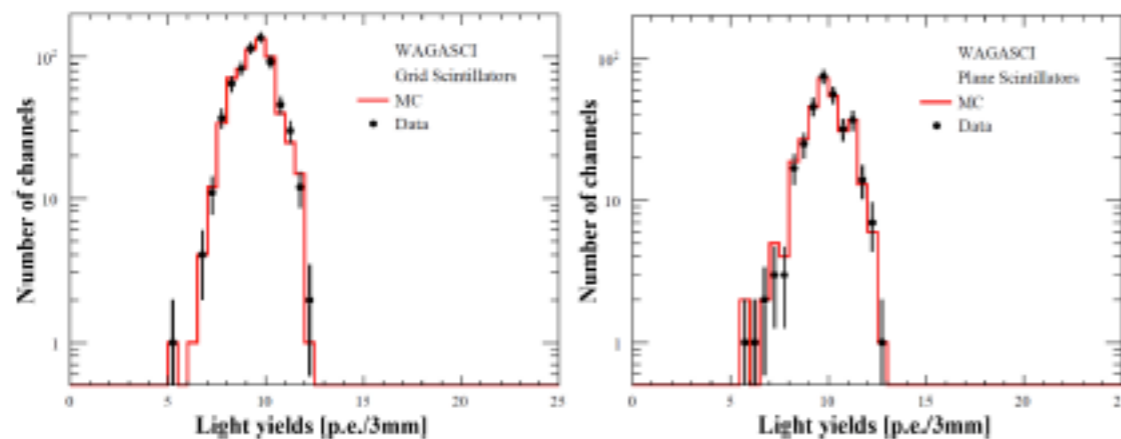


Figure 3.2: Mean light-yield distributions for all the grid scintillators (left) and plane scintillators (right) in WAGASCI.

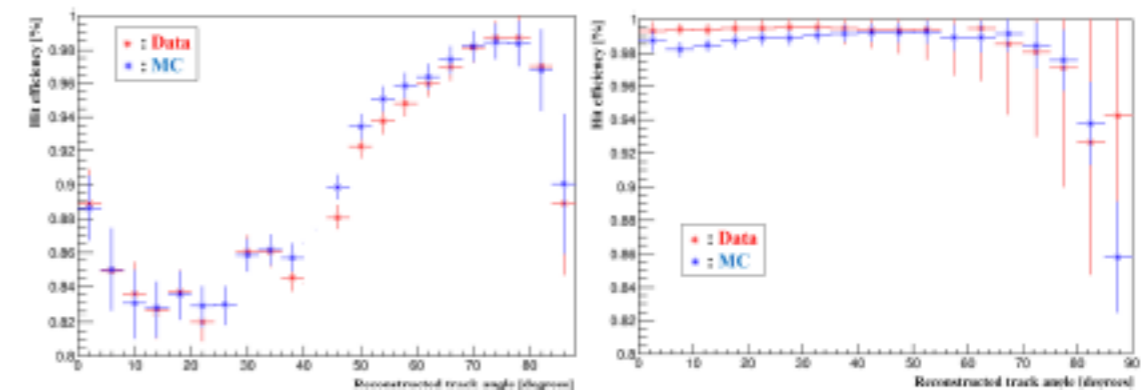
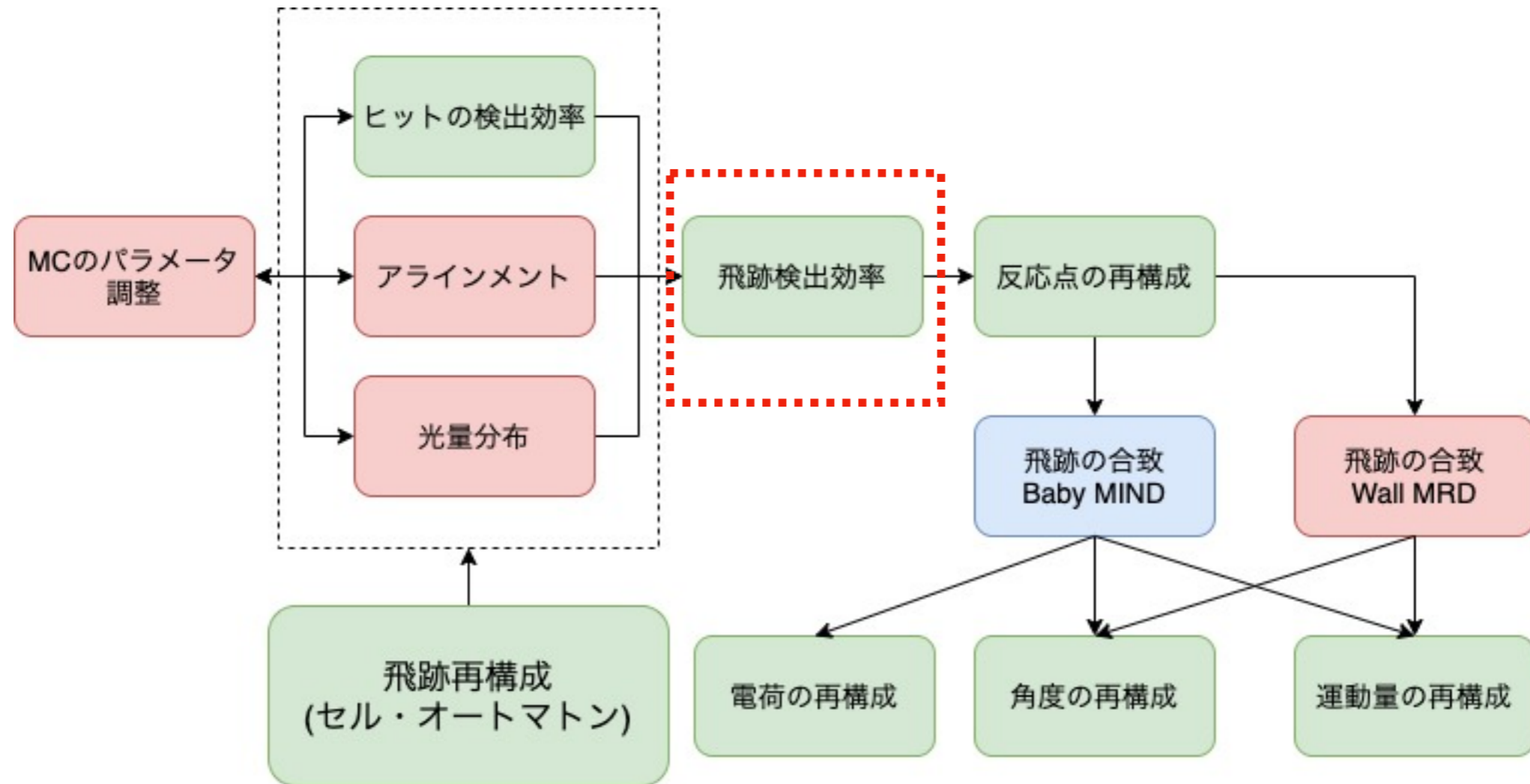


Figure 2.5: Hit efficiency estimated by cosmic muons (left) and sand muons (right).

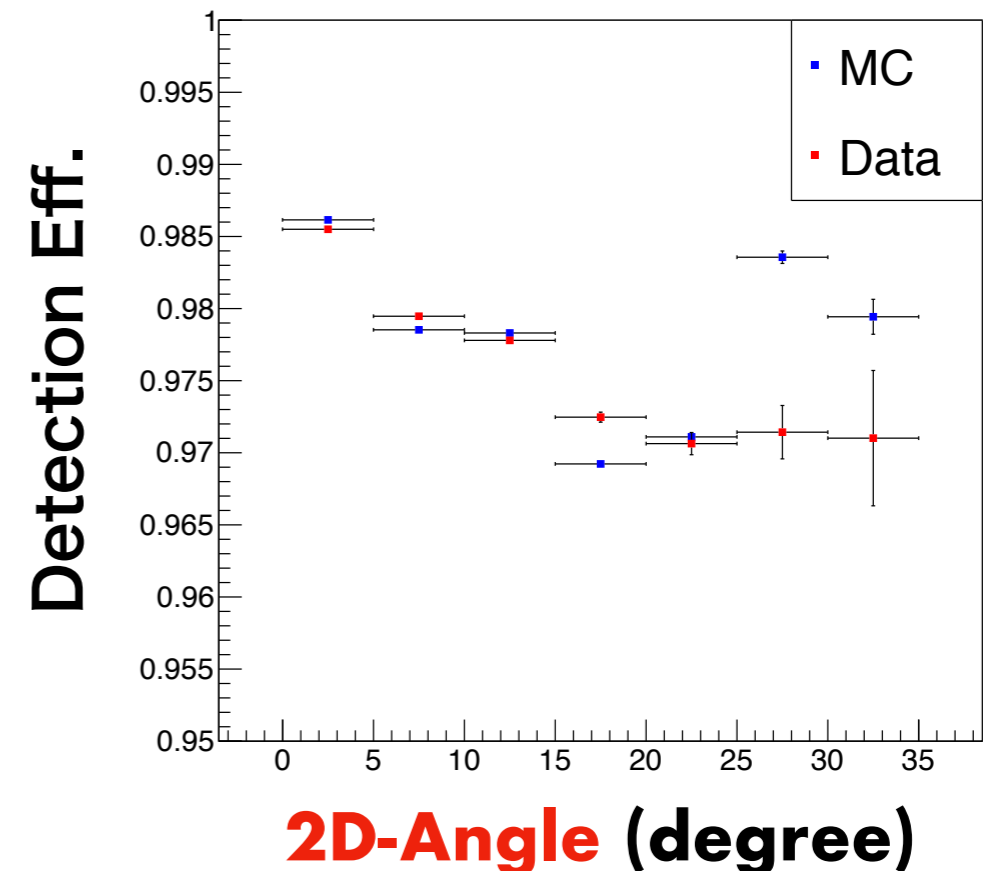
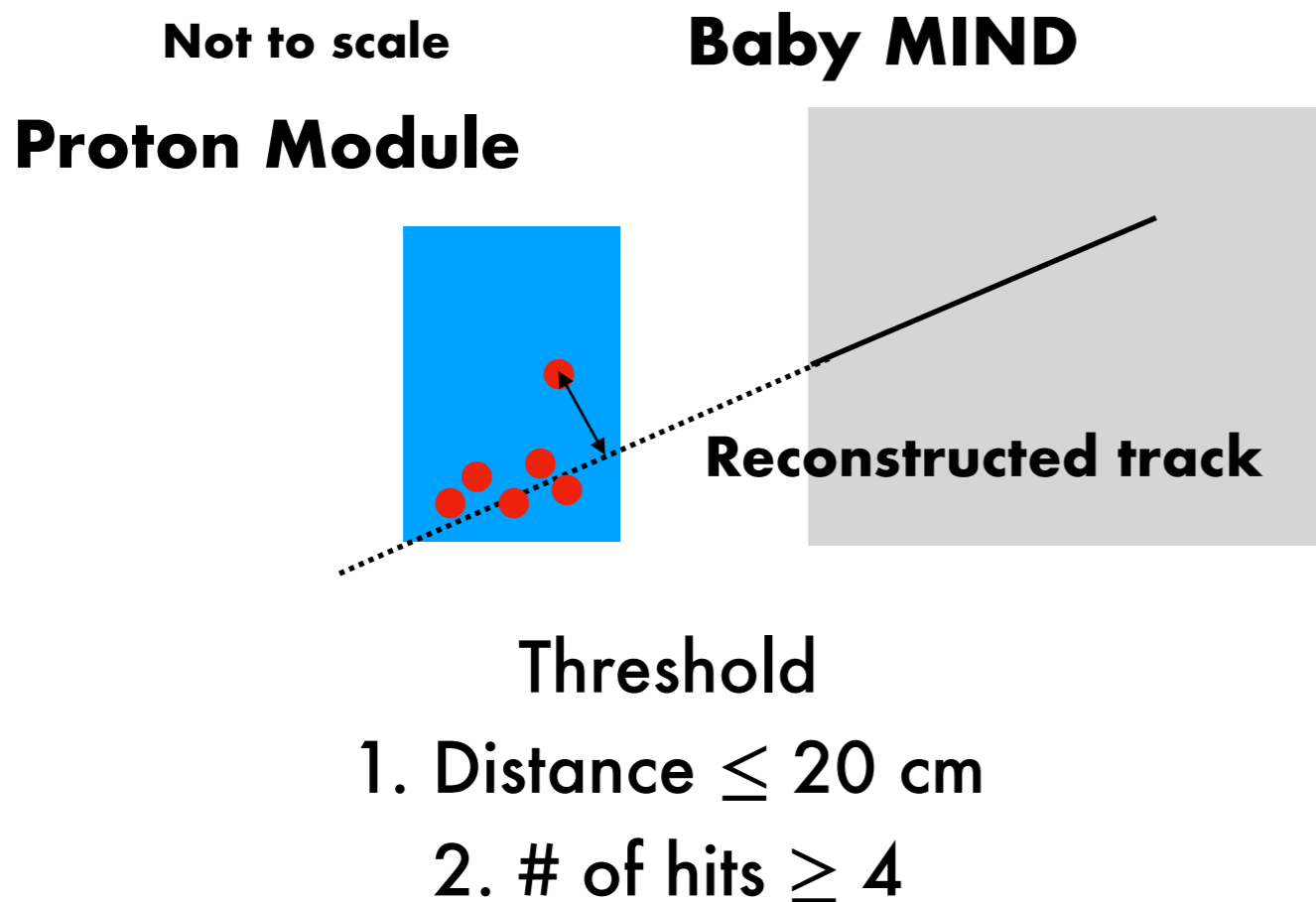


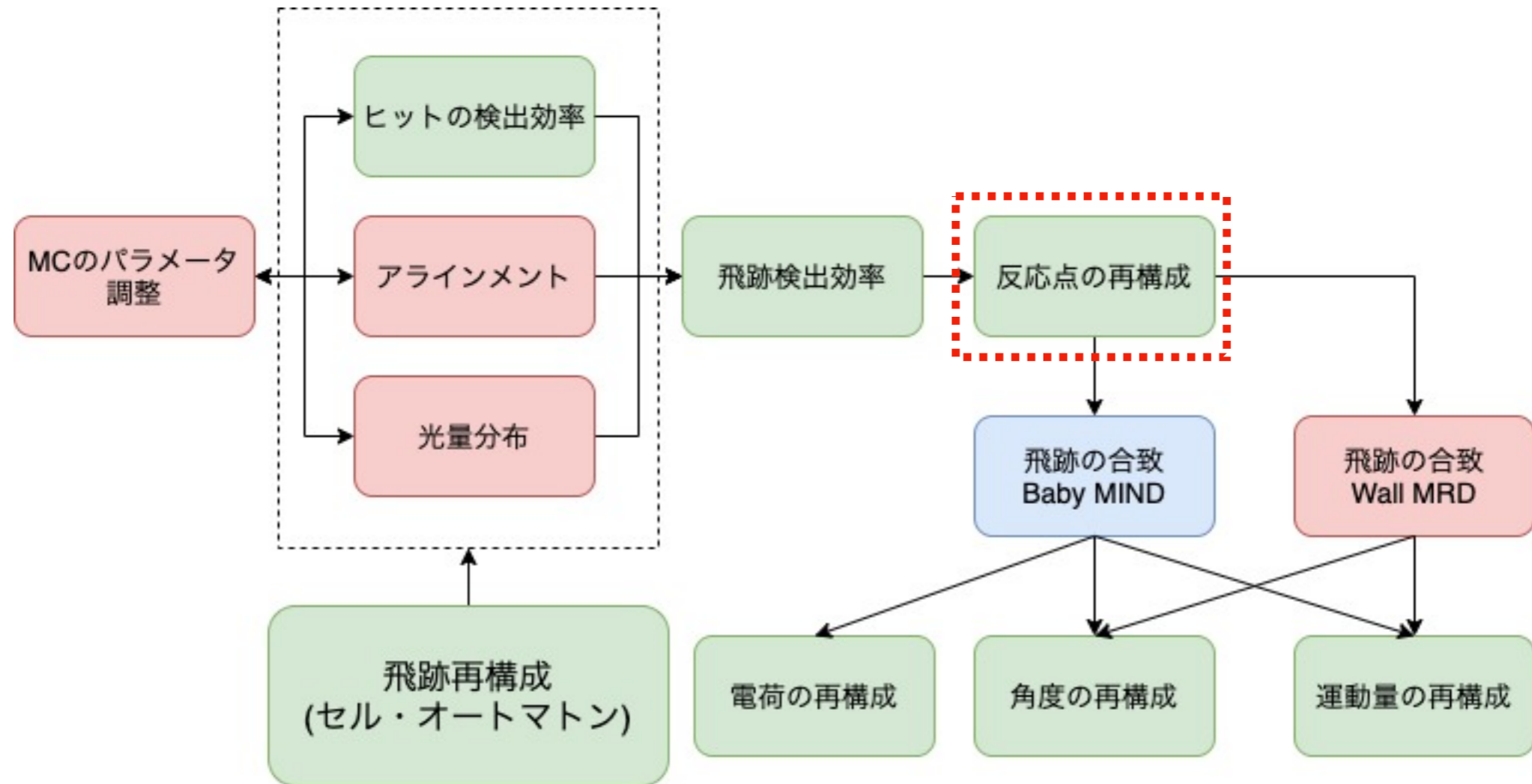
Red	Not done
Green	To be tuned
Blue	Done

Track detection efficiency



- ◆ The number of hits as threshold should be smaller.
→ I will modify reconstruction method so that it will need at least 3 successive planes which have hits.
- ◆ The right plot should be evaluated as a function of **3D-angle**.
- ◆ We will see if what happens in the plot after tuning MC.



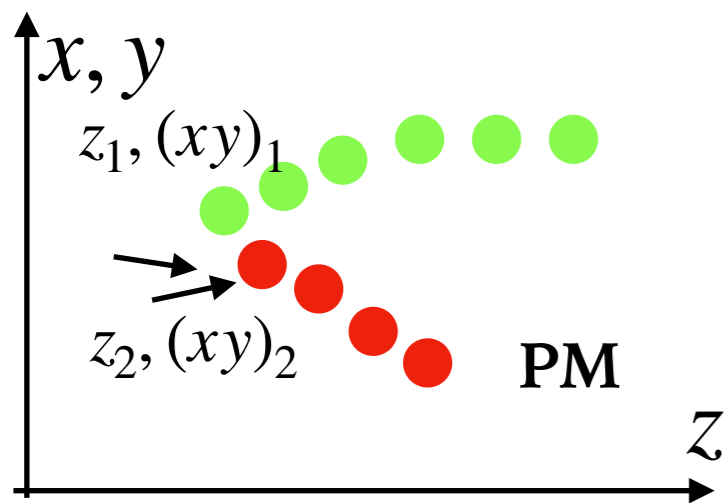


Red	Not done
Green	To be tuned
Blue	Done

Vertex Recon



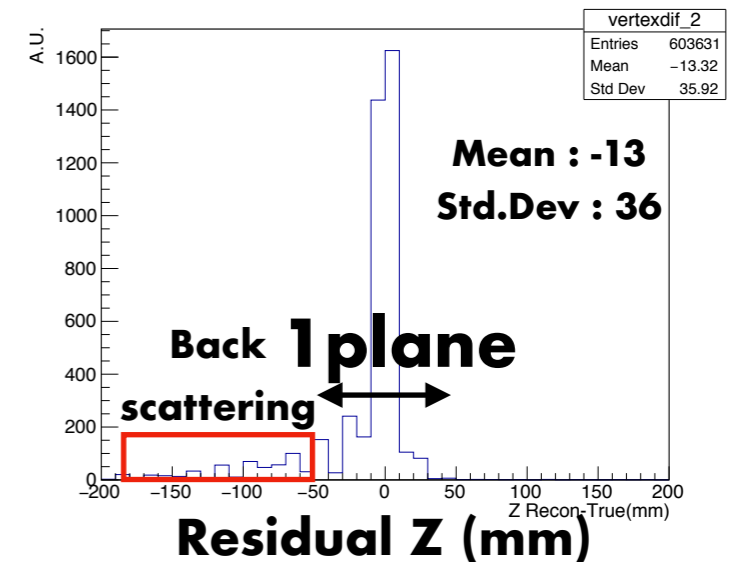
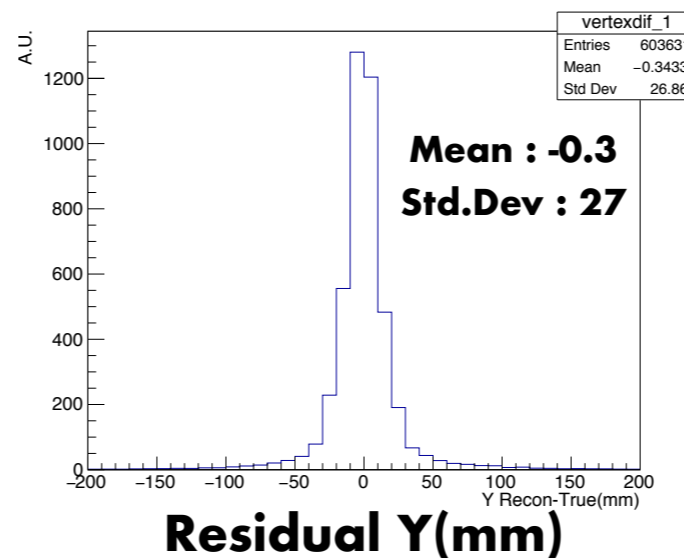
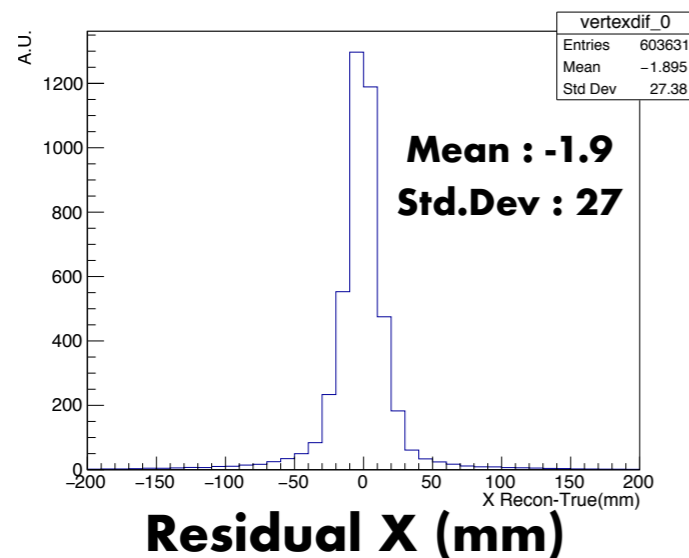
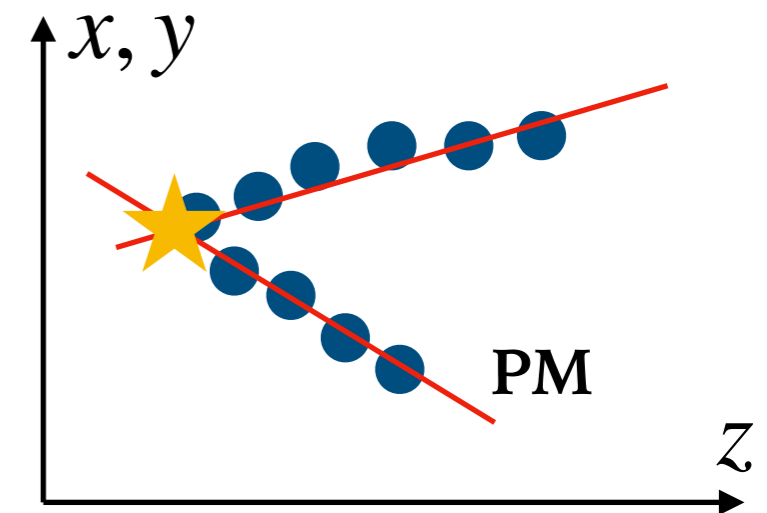
- ◆ The method itself seems working.
- ◆ **A big failure**
 - **not** telling back scattering from others
 - kink search should be polished

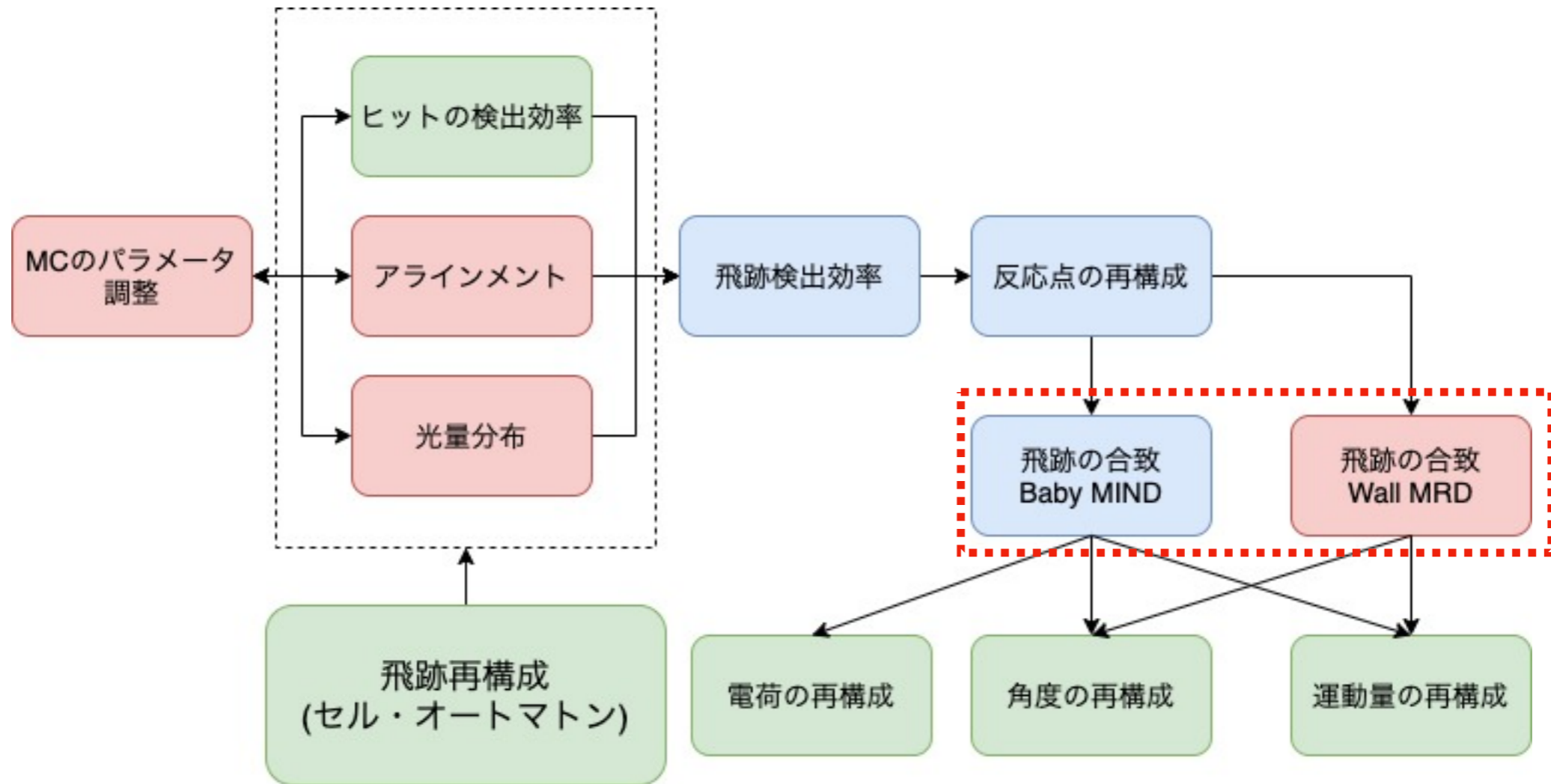


2 or more tracks

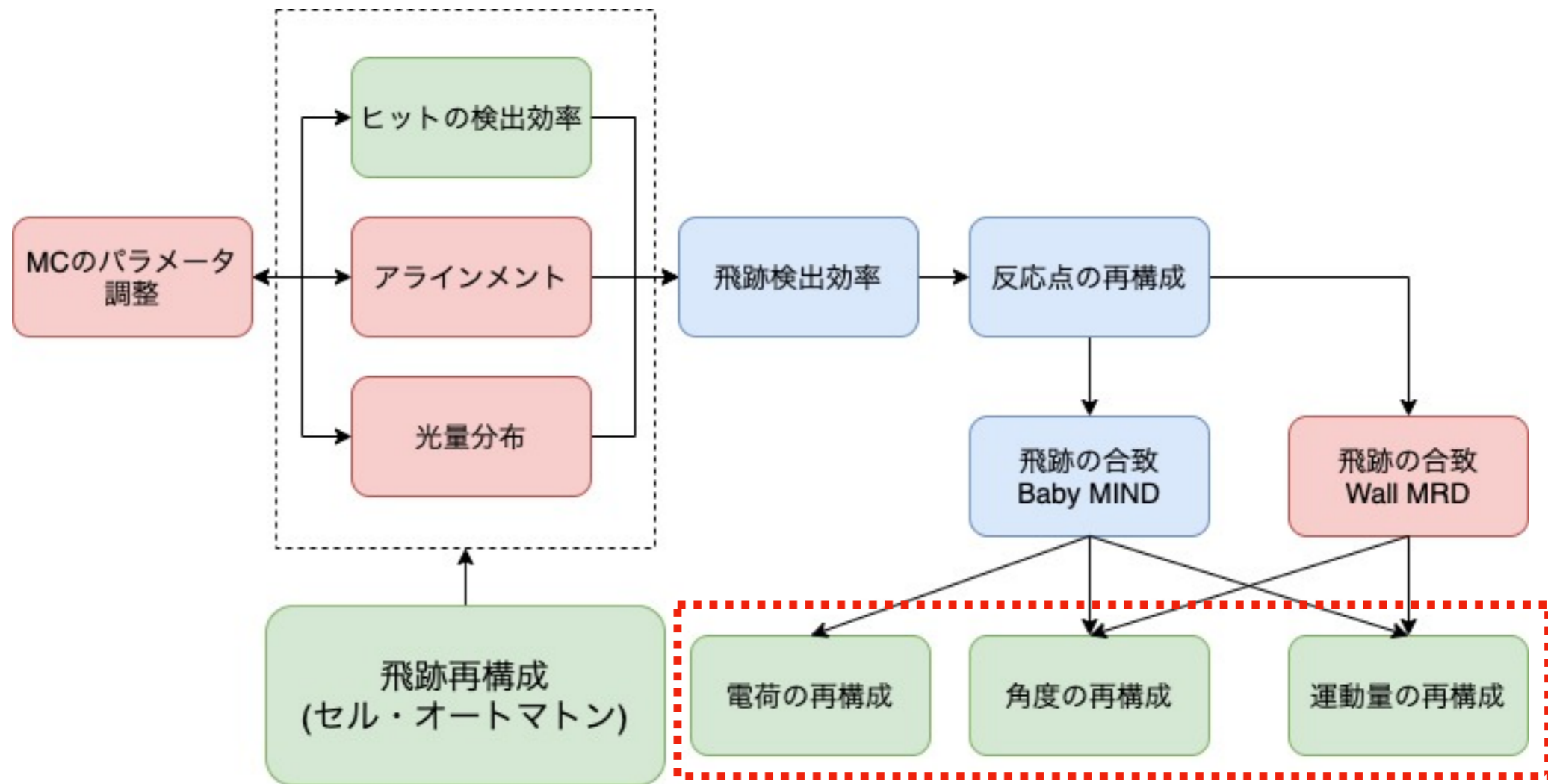
$$dz = |z_1 - z_2| < 250$$

$$d(xy) = |(xy)_1 - (xy)_2| < 150$$





Red	Not done
Green	To be tuned
Blue	Done

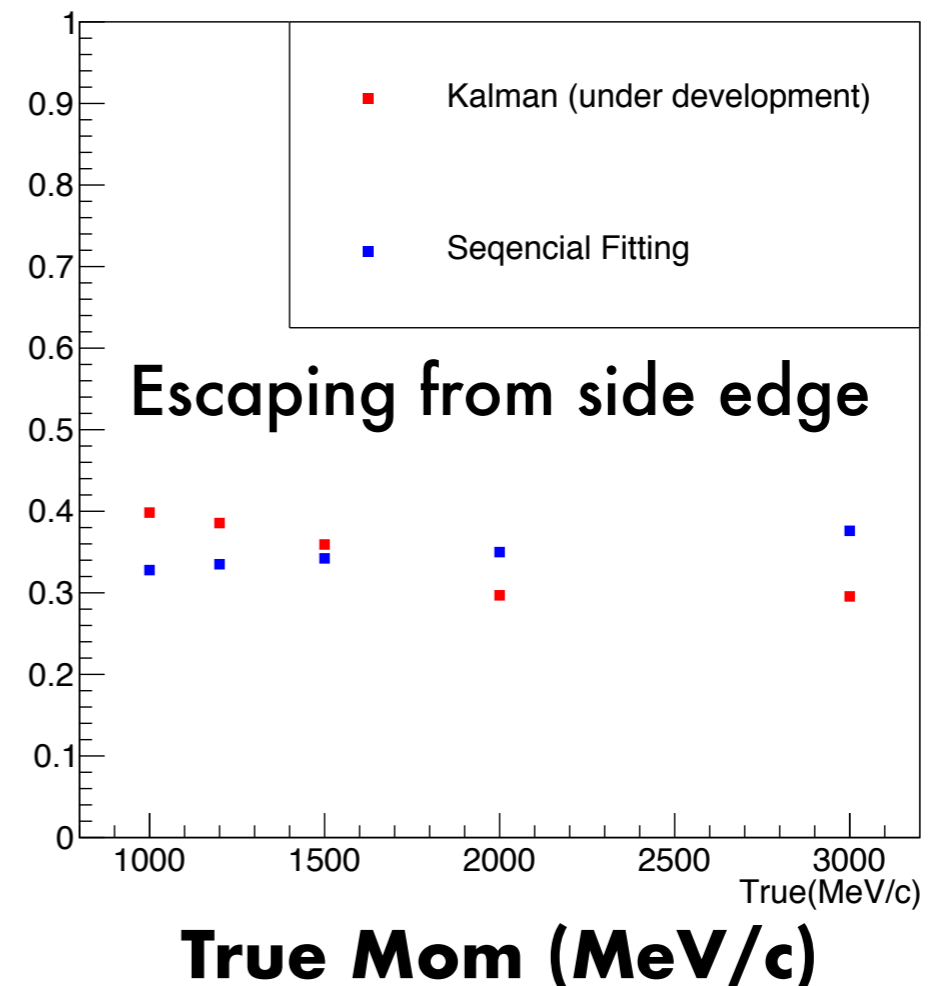
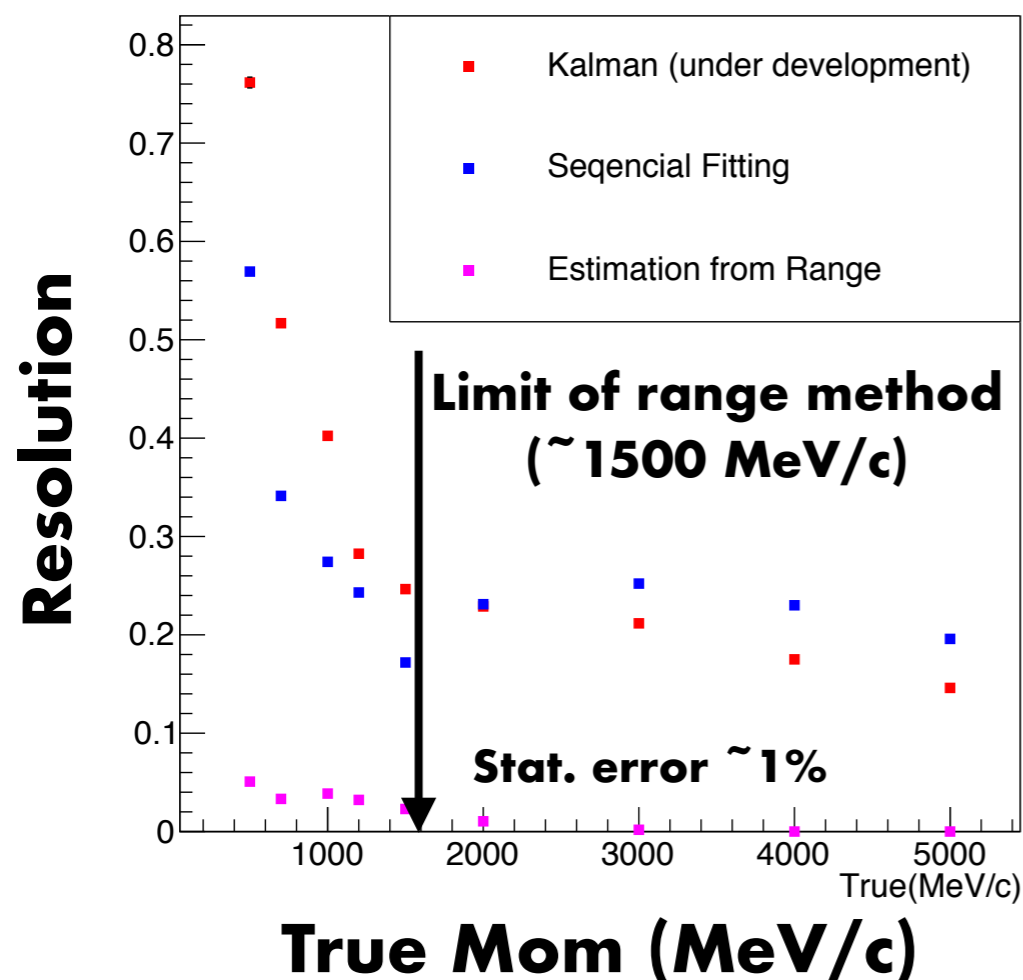


Red	Not done
Green	To be tuned
Blue	Done

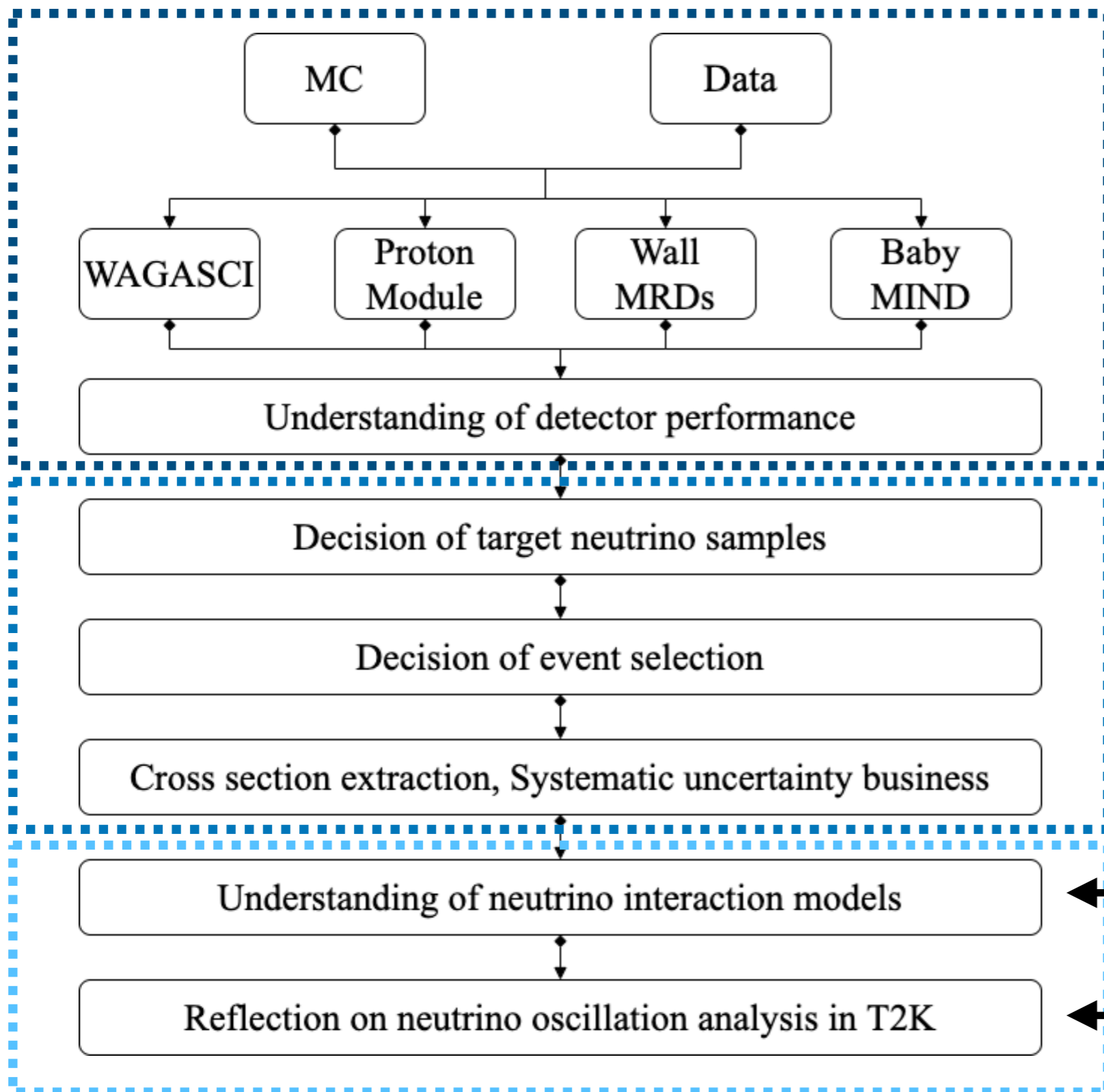
Momentum Recon.



- ◆ Resolution (@1 GeV/c μ)
 1. Range $\sim 5\%$
 2. Curvature $20\sim 30\%$ (stopping), $30\sim 40\%$ (escaping)
- ◆ For escaping muons (seen in right plots), almost same performance between Kalman & sequential fitting.



For Cross section extraction



Schedule

For the next 2~3 months
(**within this fiscal year**)

Until next T2K beam finished
(**2021 March~April**)
→ a paper business starts

Along with 2021 oscillation
analysis hopefully

After 2021 oscillation
analysis hopefully

A bit more details



- ◆ Definition of signal & side band
 - $CC0\pi0p$ (Jojo, Charlie?, Kenji), $CC1\pi$ (Ngoc), CC inclusive in BM? (Andrey)
- ◆ Definition of interests of phase space & binning (for momentum, angle)
 - depends on the efficiency curves.
- ◆ Calculation of "P" and "U" matrix
 - P matrix : $P(\theta_j^{recon} | \theta_i^{true})$
 - U matrix : U_{ij} is corresponds to a probability that events that events in reconstructed angle bin j originate from true muon angle bin i.

$$\sigma_{CH} = \sum_i \frac{U_{ij} (N_j^{sel} - N_j^{BG})}{\Phi_{PM}^{CH} T_{PM}^{CH} \epsilon_{i,PM}^{CH}}$$

Unfolding
Selected
Back ground

Flux
Target
Efficiency

A bit more details



- ◆ PID studies

- detection efficiency for pion, proton

- affects the target domains

- ◆ Calculation of integrated neutrino beam flux

- our cross section should be "flux integrated differential cross section"

- ◆ Calculation of the number of target nucleons

- ◆ Selection efficiency

- ◆ background estimation

$$\sigma_{CH} = \sum_i \frac{U_{ij} (N_j^{sel} - N_j^{BG})}{\Phi_{PM}^{CH} T_{PM}^{CH} \epsilon_{i,PM}^{CH}}$$

Unfolding
Selected
Back ground

Flux
Target
Efficiency

Open questions



- ◆ **Joint momentum reconstruction (mainly for NINJA collaboration)**
 - ◆ If the particle with μ id stops in Baby MIND, how should we reconstruct the momentum? MS, Curvature, or Range?
 - resolution –
 - 1. MS : $\sim 20\%$ (@ 1 GeV/c)
 - 2. Curvature : 30~40% (@ 1 GeV/c)
 - 3. Range : $\sim 5\%$ (@1 GeV/c)
 - ◆ If not? MS or Curvature?

- ◆ **Systematic studies**
 - ◆ How do we proceed?
 - ◆ When should be studies finished?
 - ◆ etc.

Backup



- ◆ Momentum residual plots
- ◆ Results shown in JPS (2020 Autumn)



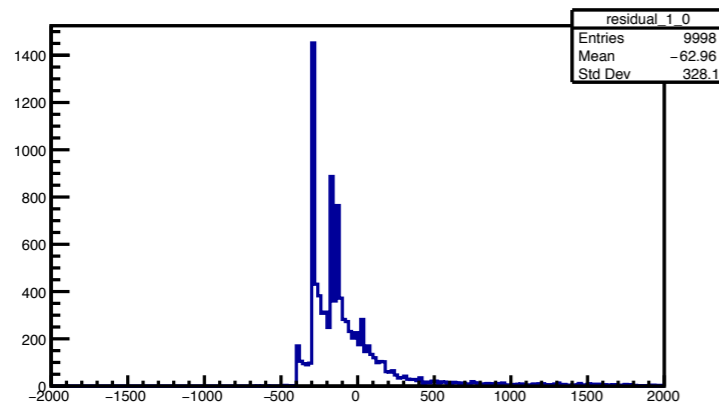
Momentum residual

Mom. Residual

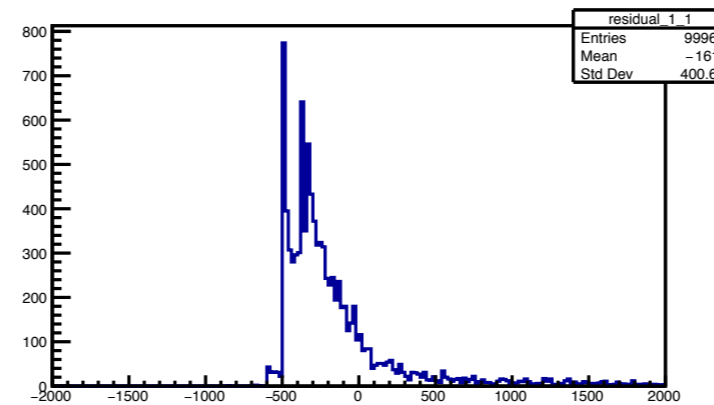


Sequential Fitting (Recon - True)

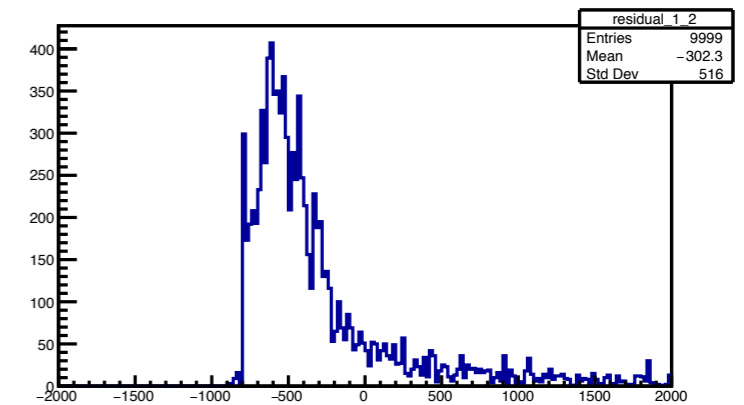
1 GeV/c



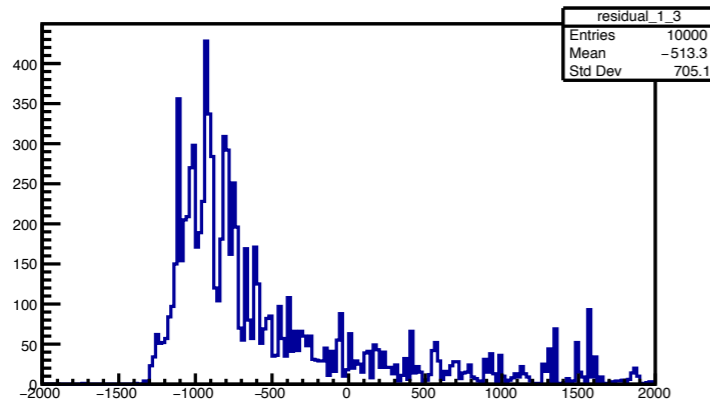
1.2 GeV/c



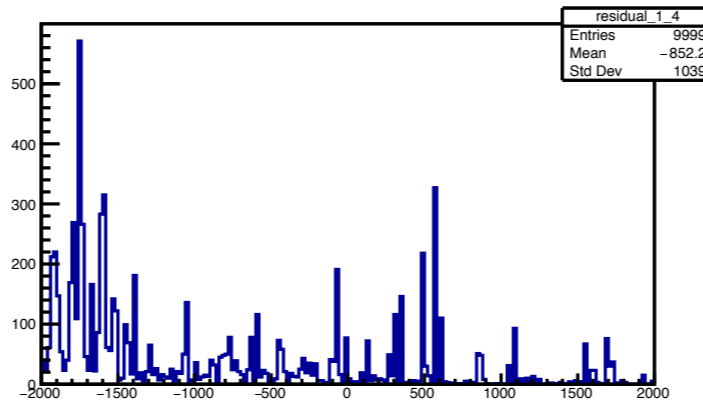
1.5 GeV/c



2.0 GeV/c



3.0 GeV/c

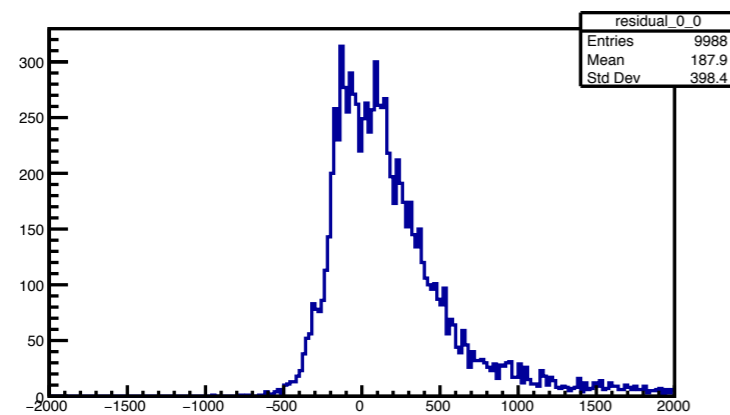


Mom. Residual

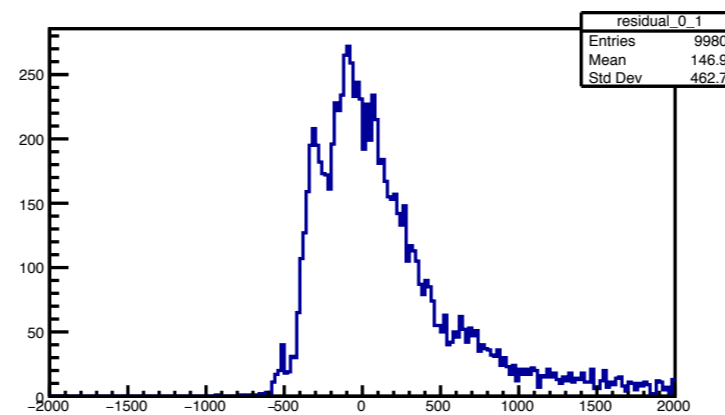


Kalman Filter (Recon - True)

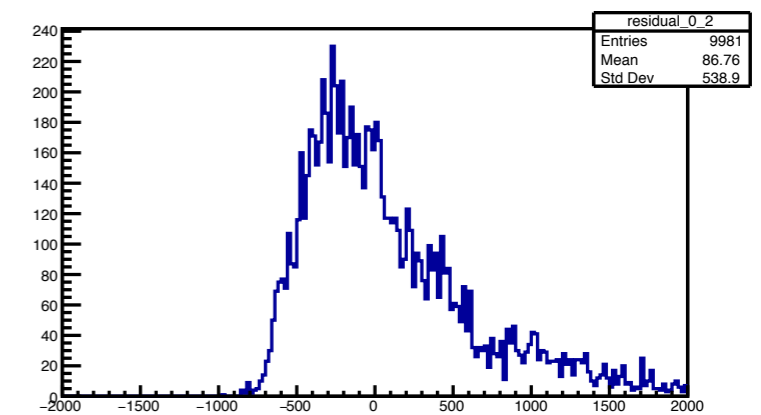
1 GeV/c



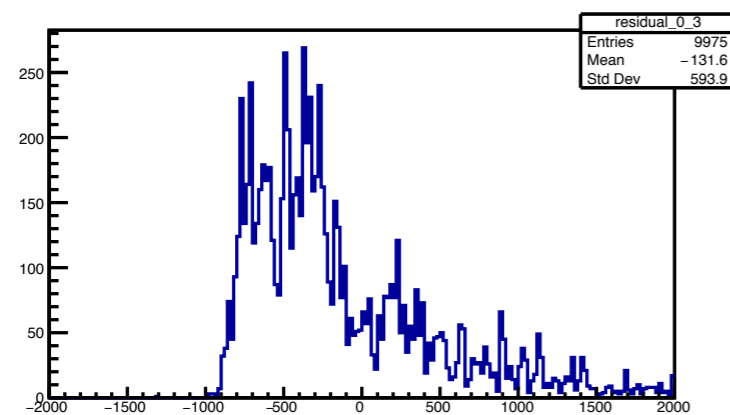
1.2 GeV/c



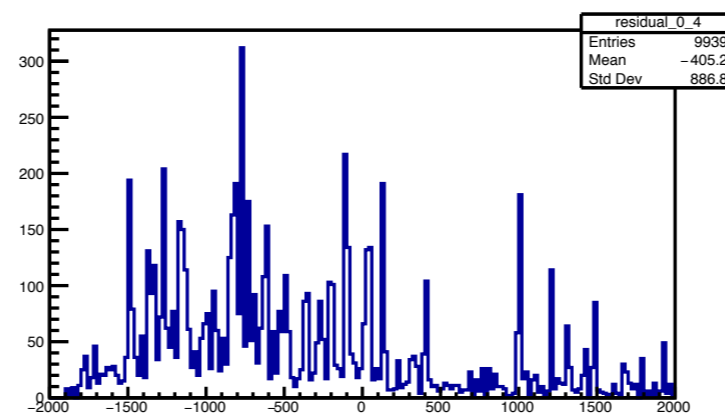
1.5 GeV/c



2.0 GeV/c



3.0 GeV/c

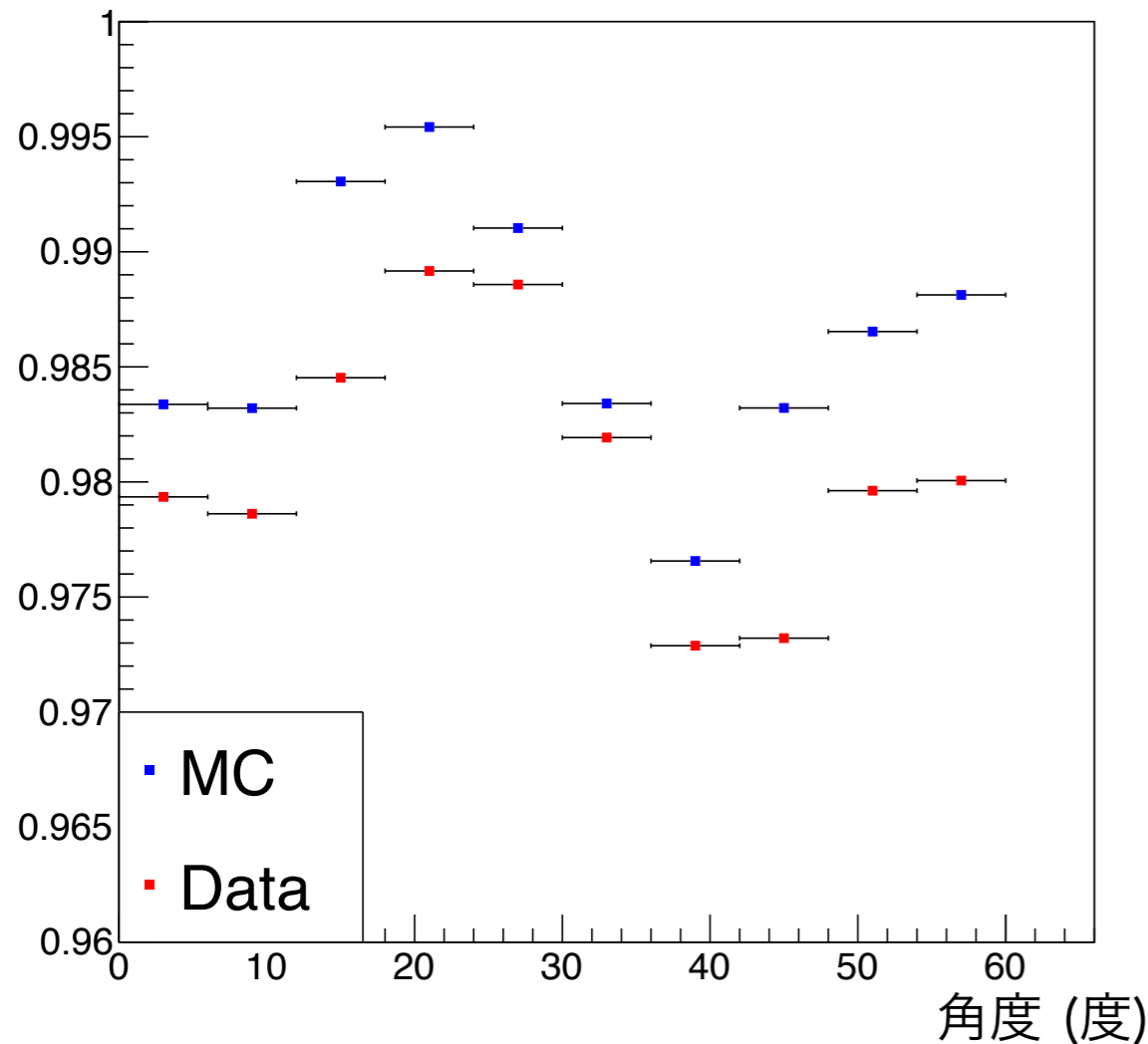




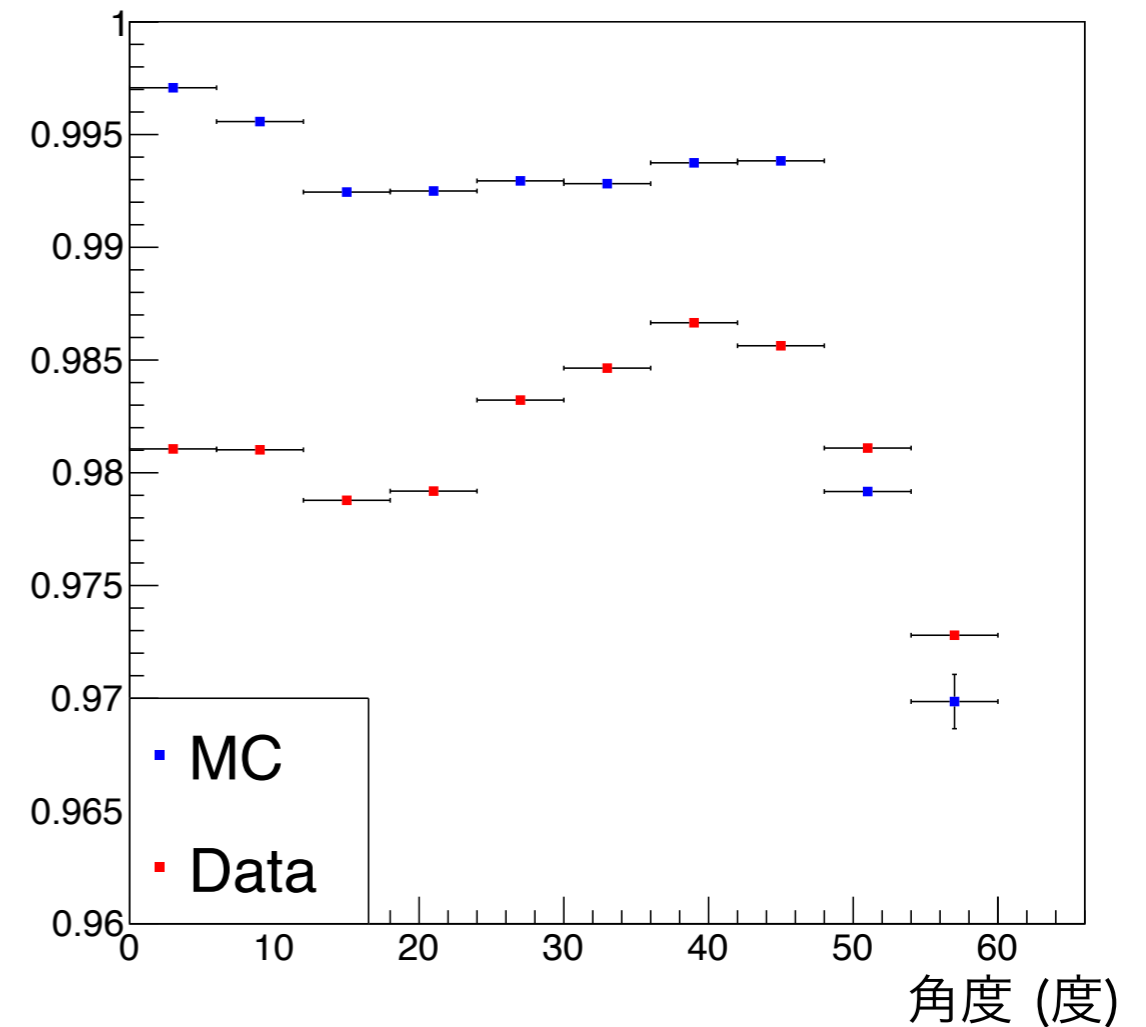
Results shown in JPS (2020 Autumn)

ヒット検出効率 (全層平均)

Proton Module



Baby MIND



- 実験ホールにおけるニュートリノ反応由来のミュオンを用いて以下を計算。

(標的プレーンかつ隣接プレーンにヒット)/(隣接プレーンにヒット)

* 標的プレーン：検出効率を求めたい層, 隣接プレーン：標的プレーンの両側に隣接する層

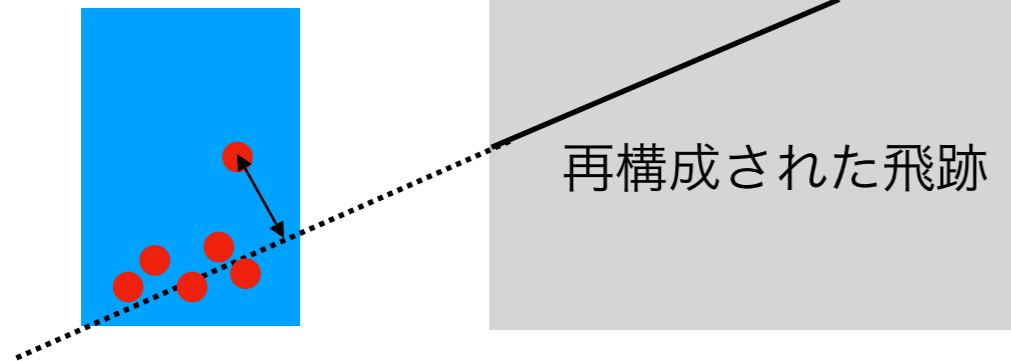
- いずれも97%以上の高い効率を持っており、期待される性能を発揮している。取得したデータに対するMCの再現性が完璧ではないため、MCのパラメータの見直しが必要。

飛跡の検出効率

[スケールは不正確]

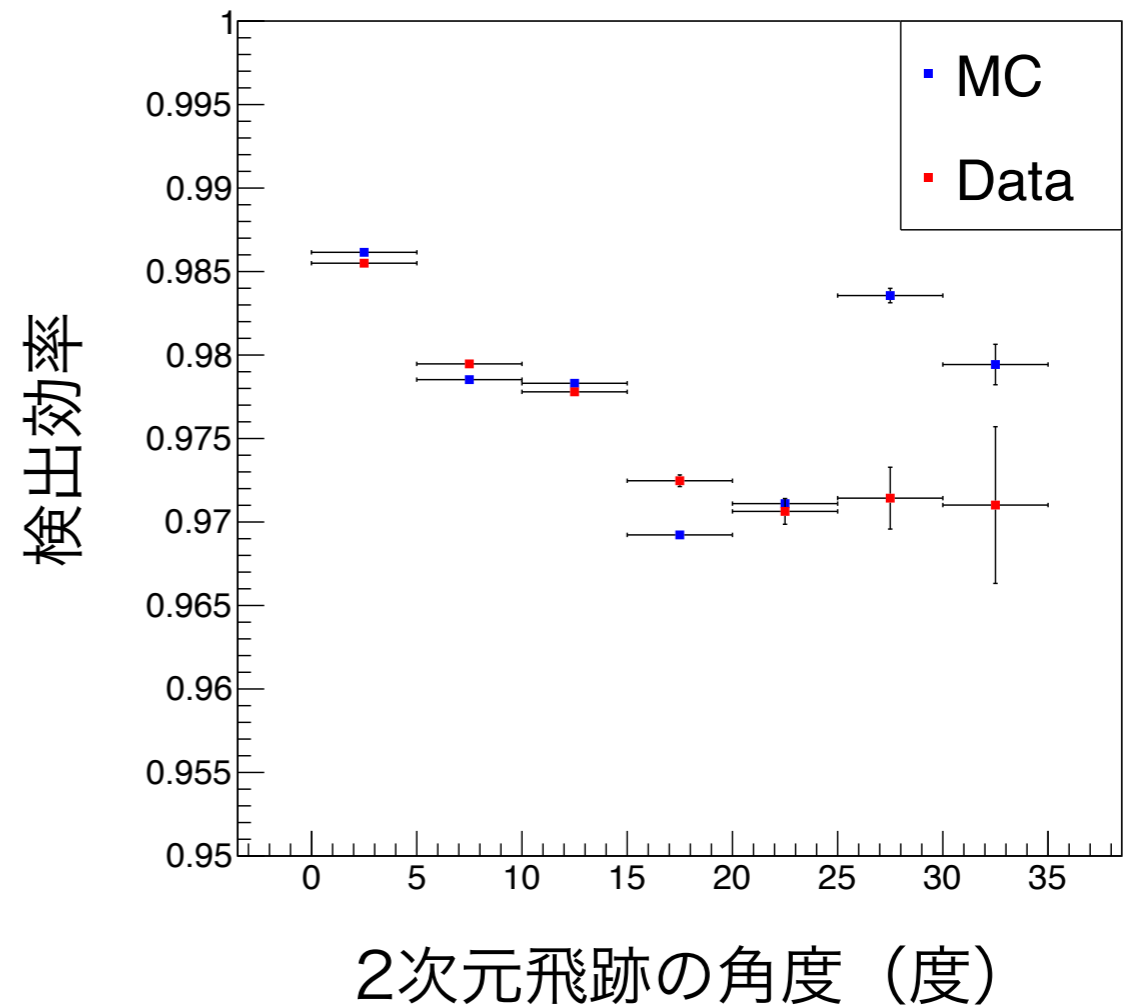
Baby MIND

Proton Module



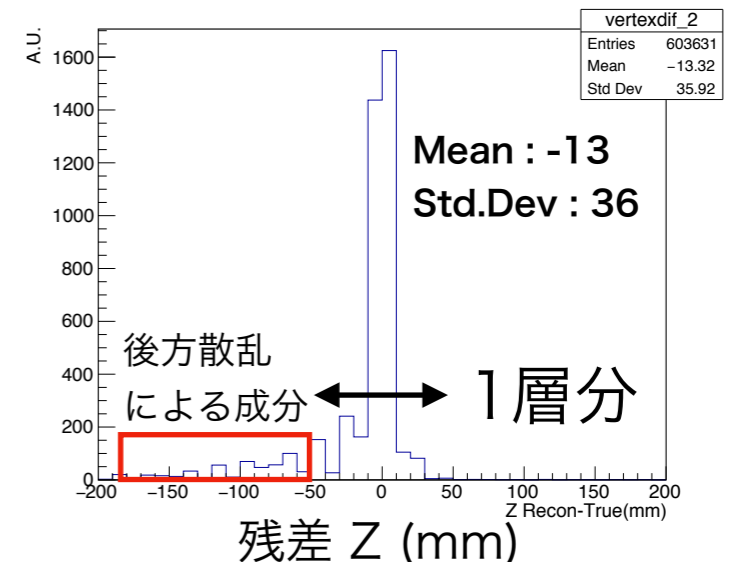
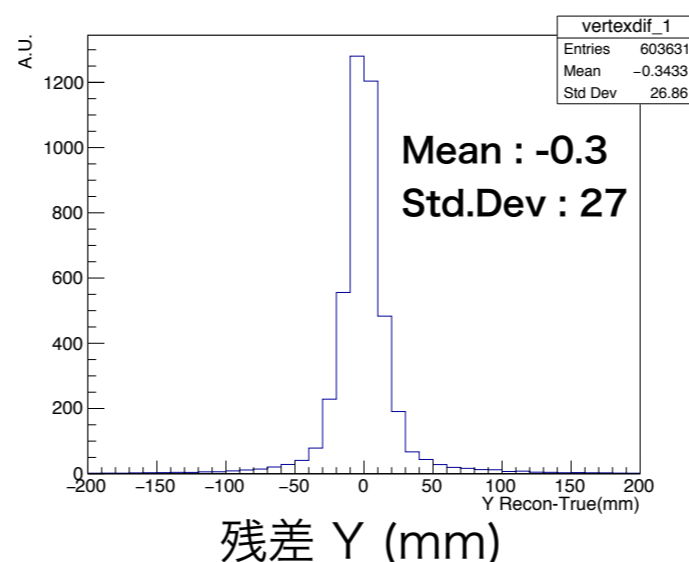
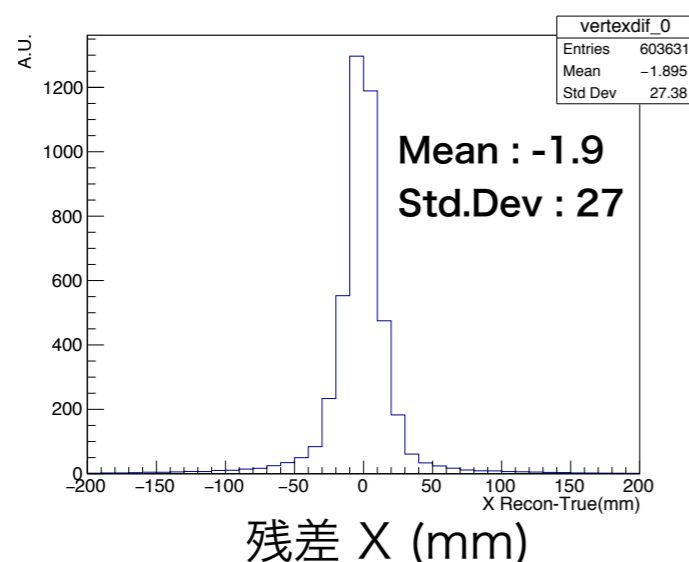
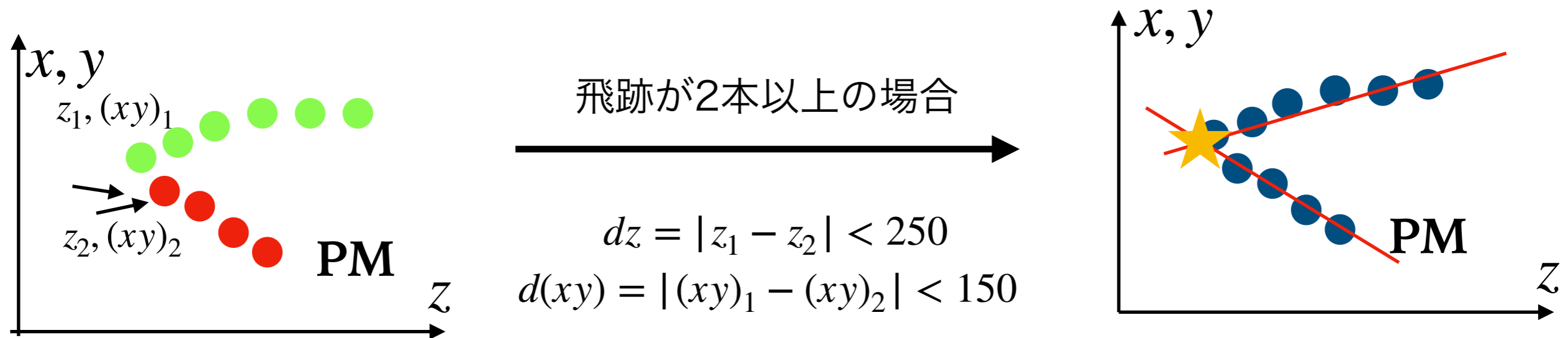
Baby MINDから外挿した直線と
Proton Module上の点
との距離が20 cm以内にあるヒットが
4つ以上ある時に、Proton Moduleで
飛跡が再構成されているかを調べ、
検出効率を計算する。

- ☑ 飛跡はセル・オートマトン法を用いて再構成した。
- ☑ MCとデータはいずれの角度においても数1~2%以下の精度で一致しており、ほとんどの事象が存在する角度40度未満の範囲内において97%程度の検出効率があり、開発した手法は、物理解析のために十分高い性能があると思われる。



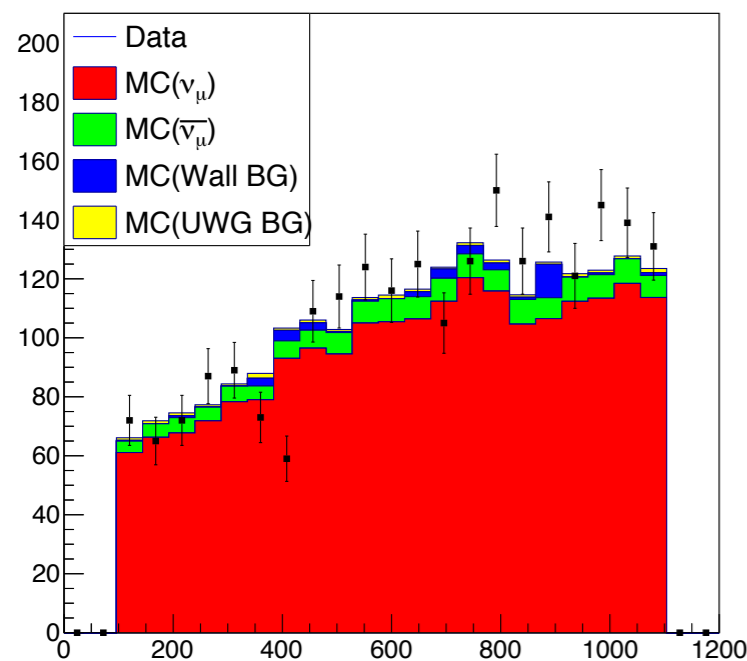
反応点の再構成

- 再構成された飛跡が1本の場合は、2次元上でその飛跡を直線フィッティングし、その直線上の点で、最上流のシンチレータの中央の位置に相当する座標を反応点とする。
- 再構成された飛跡が2本以上の場合は、それぞれの飛跡の最上流のヒットの位置の差を調べ、同じ反応点由来かどうかを決定する。その後、同じ反応点由来の飛跡が2本以上ある場合は、最も長い2本のトラックの交点を反応点とする。
- XZ, YZ平面で独立に反応点を再構成し、小さい方のZ座標を反応点のZとした。

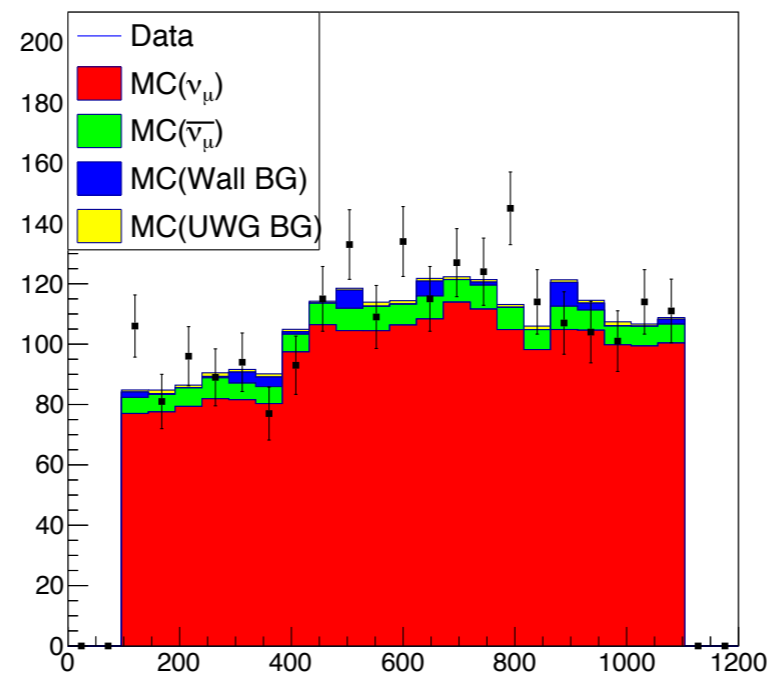


反応点の分布

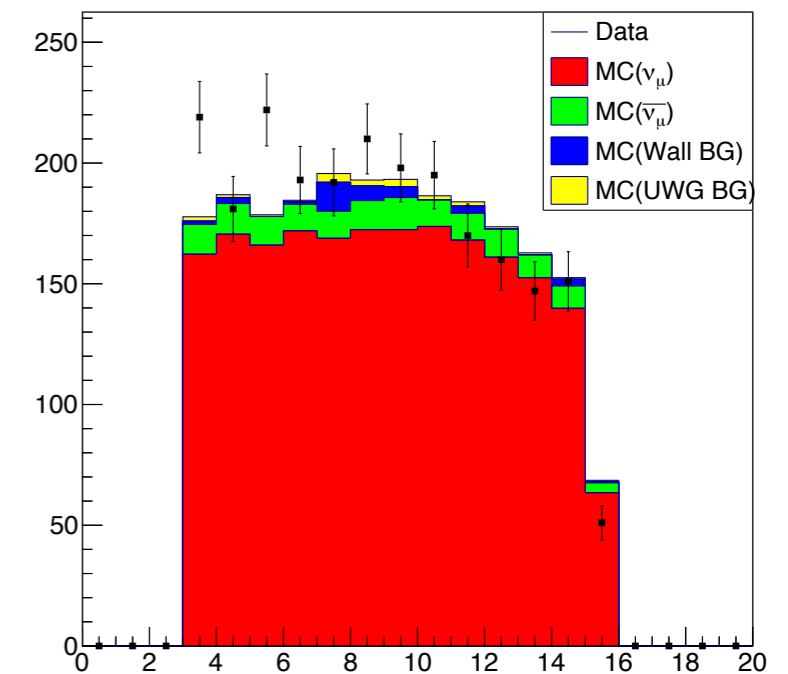
ニュートリノ事象を選択した後に再構成したニュートリノ反応点のデータとMCの比較



反応点のX位置 (mm)



反応点のY位置 (mm)

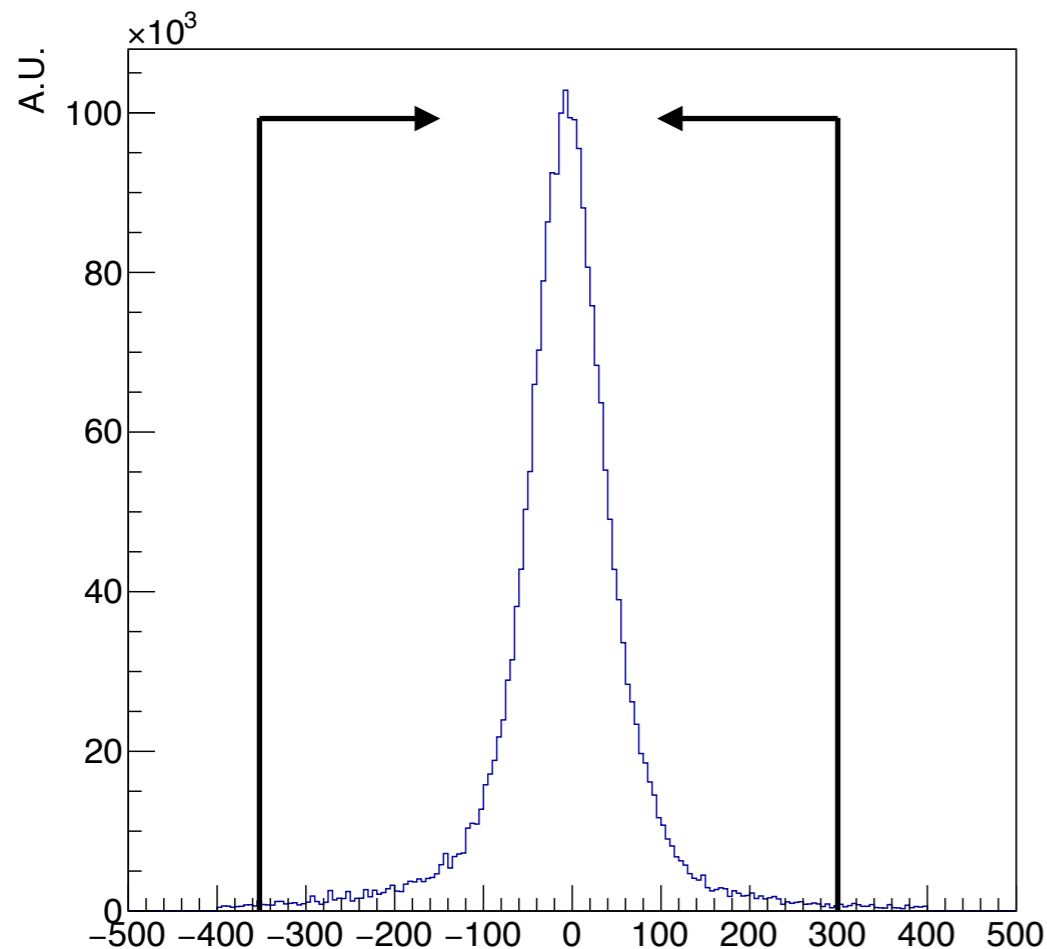


反応点のZ位置 (pIn)

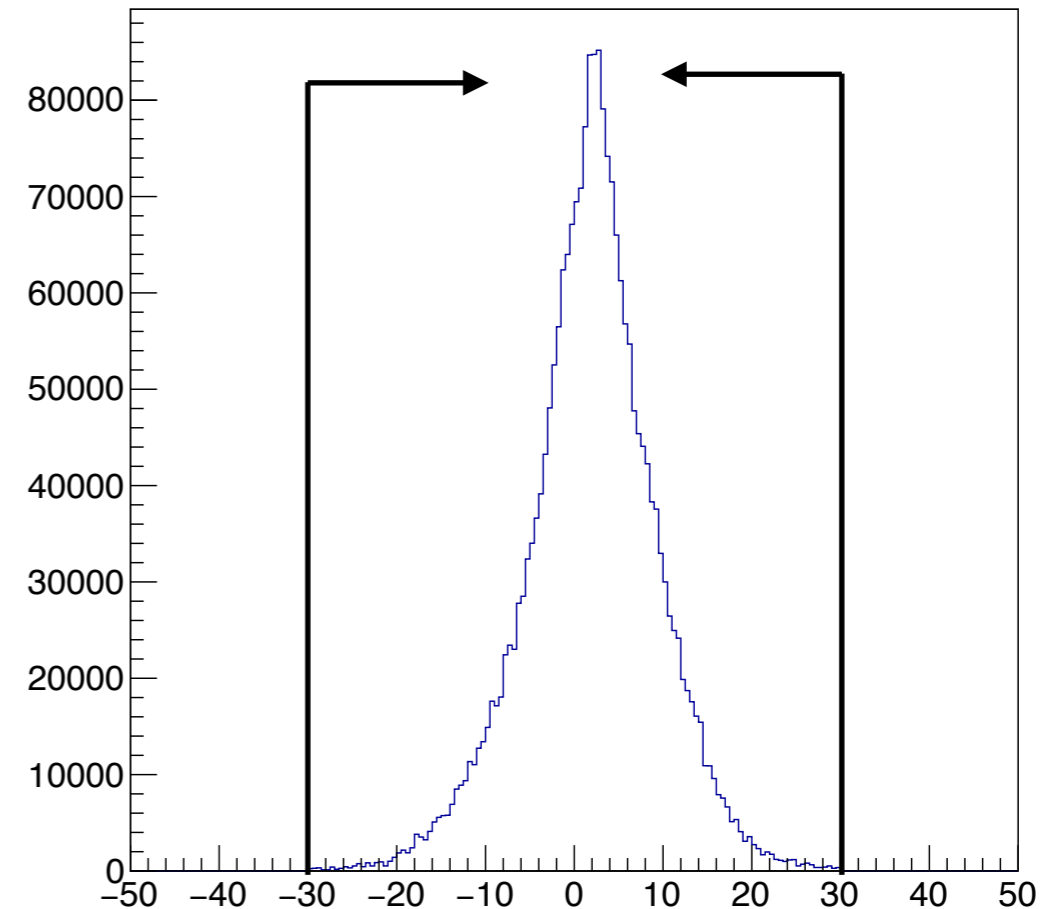
- ☑ 前述の方法をデータとMCに適用させ、反応点の分布を調べた。
- ☑ X, Y, Zのどの位置においても、データとMCの予測がよく一致している。
- ☑ このことは、Proton Module, Baby MINDによるデータ取得が正常に行われていたことを示している。それと同時に、再構成アルゴリズムがニュートリノ事象を選択するのに高い精度があることを表している。

飛跡の合致

Proton ModuleとBaby MINDの2次元飛跡の位置（左） および角度（右） の差



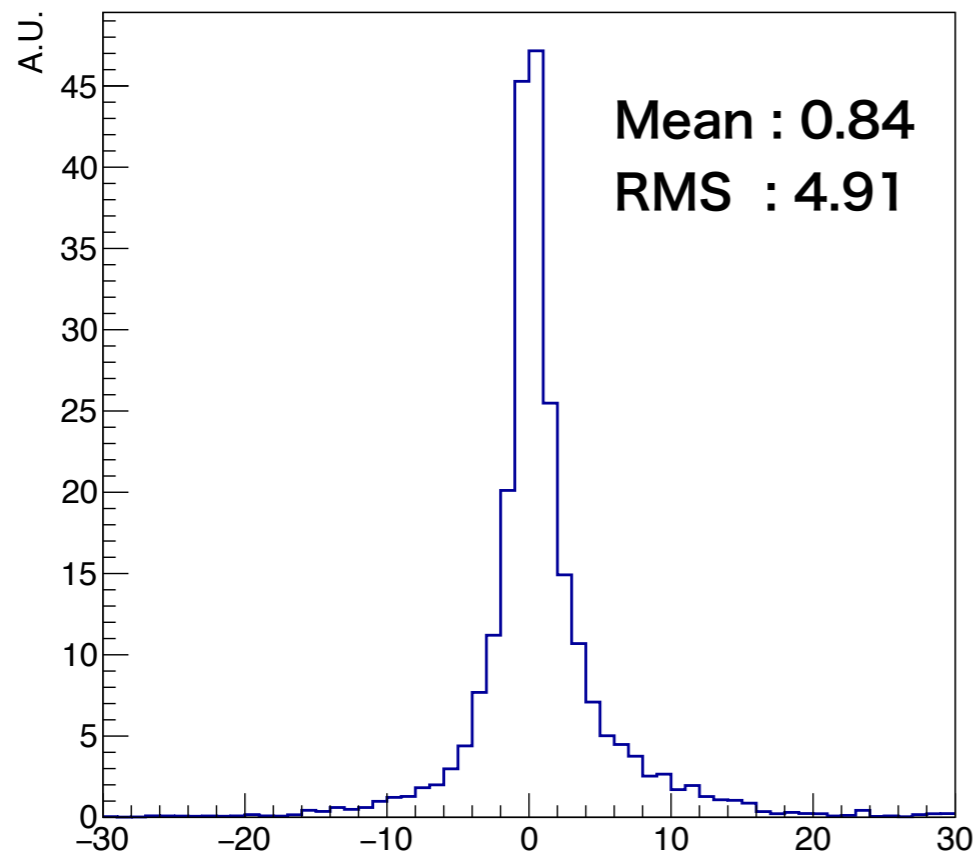
YZ平面の位置の差 (mm)



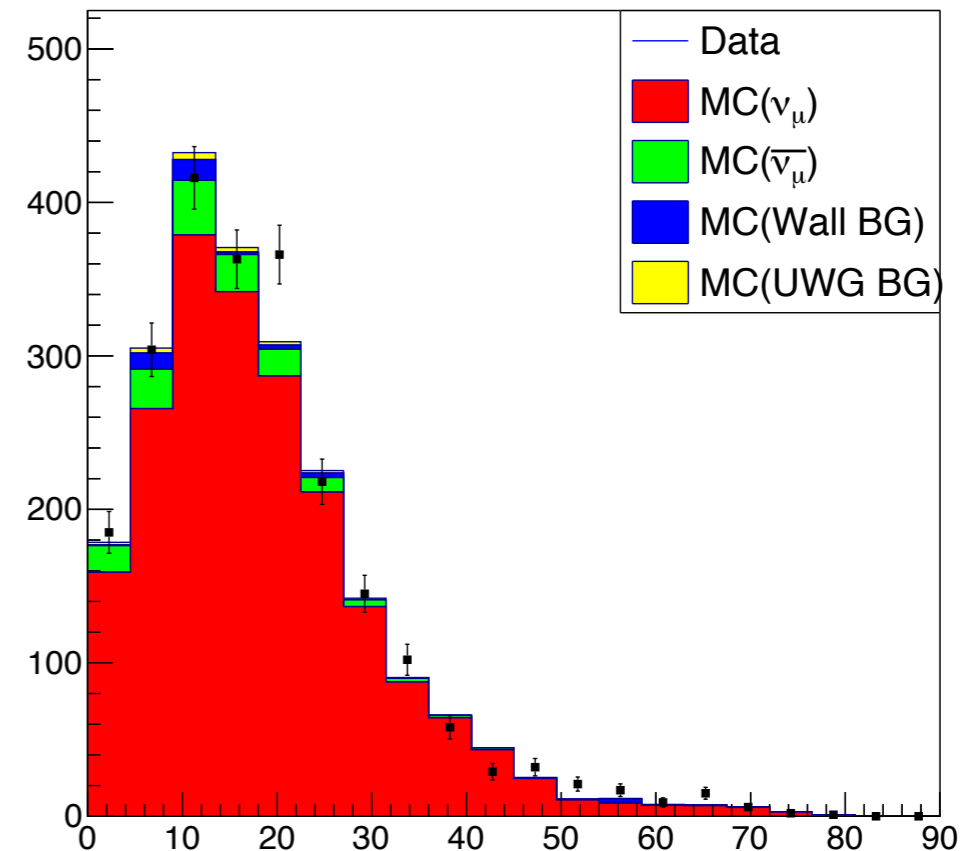
YZ平面の角度の差 (度)

- ☑ XZ, YZ平面の飛跡について、以下の条件を満たす時、Proton ModuleとBaby MINDの飛跡が合致したとする。
 - ☑ 反応点からBaby MINDに外挿した点と最上流のヒットとの差が350 mm未満
 - ☑ Proton ModuleとBaby MINDの飛跡の角度差が30度未満
- ☑ 飛跡の合致によりミューオン候補を選び、荷電カレント反応の純度を上げることができる。

角度の再構成



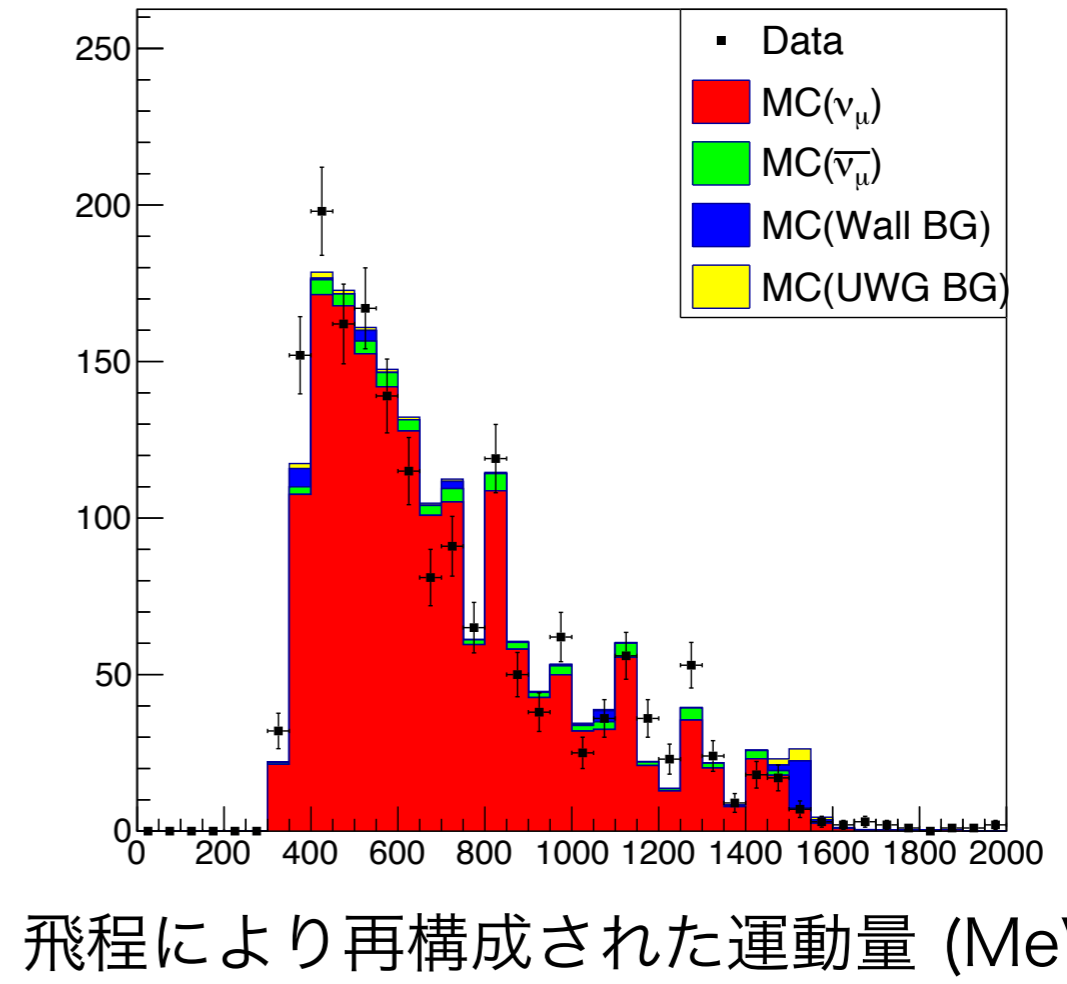
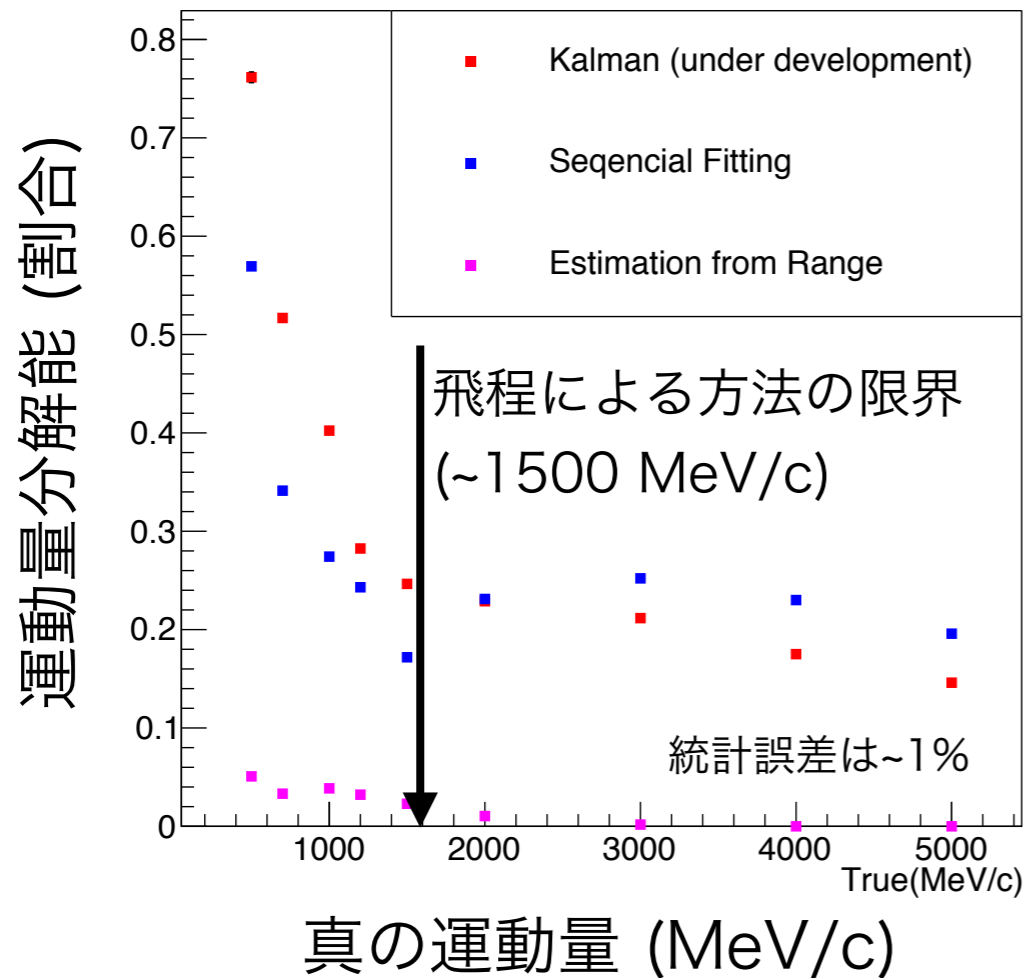
角度の残差 (再構成 - 真値)(度)



再構成された角度 (度)

- ☑ 合致した飛跡に対し、直線フィッティングを行い角度を再構成した。
- ☑ 直線フィッティングによる角度の分解能は5度程度（左図）であり、物理解析のためにすでに十分な精度があることを確認した。また、その手法をニュートリノ事象に適用した(右図)。今後、MCの見直しを行った後に同様の解析を行って、角度の微分断面積の導出を行っていく。

運動量の再構成



- ❑ Baby MINDで静止した飛跡に対して、飛程による手法を用いると6%の精度で運動量を再構成でき、微分断面積の解析のために、飛程による運動量の再構成は有効であることがわかる。角度と同様に運動量についてもデータとMCを比較し、運動量による微分断面積の導出の準備を行った。
- ❑ また、Baby MINDで止まらない飛跡の運動量をより精度よく再構成できるようにするため、新たにカルマンフィルターを実装したアルゴリズム(GenFit)を導入した。現状では、逐次フィッティングと同程度の分解能。
- ❑ 飛程の情報を与えアルゴリズムを改善するなどの工夫により性能を向上させ、物理解析への応用を目指す。