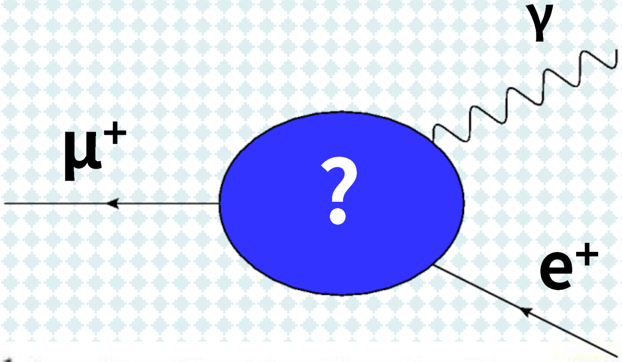
MEG実験全データを用いた $\mu^+ \to e^+ \gamma$ 探索解析

金子大輔　他 MEGコラボレーション
東京大学　素粒子物理国際研究センター

MEGの物理

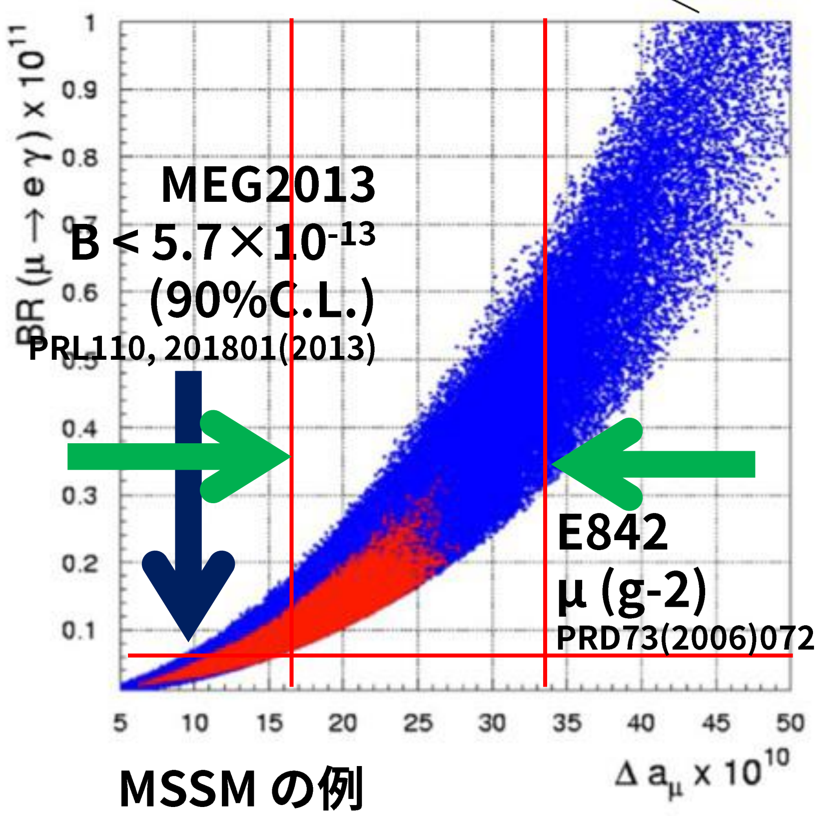
$\mu^+ \to e^+\gamma$



レプトンフレーバーが
保存しない過程
荷電レプトンでは未発見

標準理論では起こらないが、
新しい物理現象の量子効果
を通じてのみ起こり得る

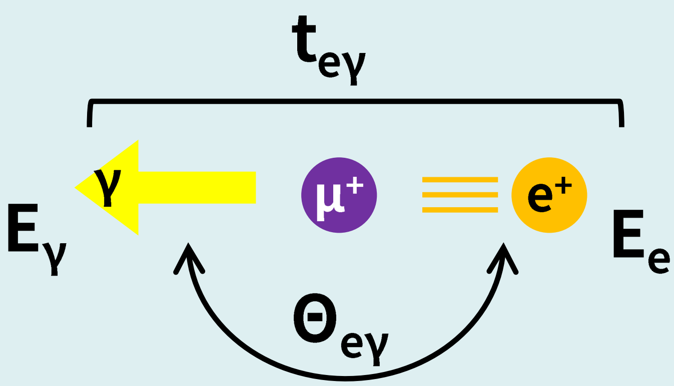
幾つかの有力な理論で
検出可能な分岐比　10^{-12}～10^{-14}
が予言されている



MSSM の例
Large tanβ & Heavy squark
Isidori et al, Phys. Rev. D 75, 115019 (2007)

MEGの信号

信号事象



本物のμ⁺→e⁺γなら

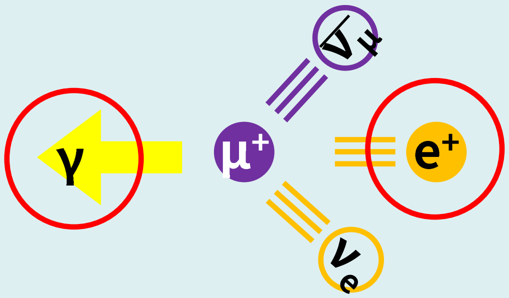
$E_\gamma = E_e = 52.8$ MeV

$t_{e\gamma} = 0$ s

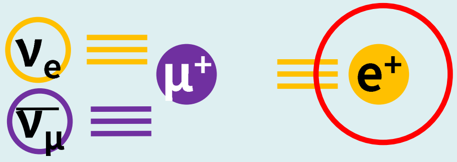
$\Theta_{e\gamma} = 180°$

背景事象

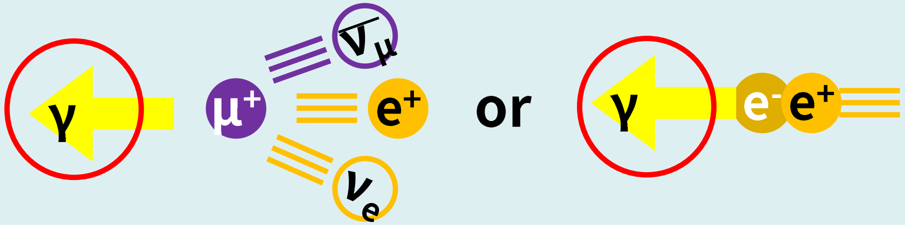
Radiative Muon Decay



Accidental Background (こっちが主)



+



解析の方式

Likelihood関数を次のように定義

Extended maximum likelihood

N_{RD}, N_{BG} を side bandからの予測の付近に束縛

$$\mathcal{L}(N_{\mathrm{sig}}, N_{\mathrm{RD}}, N_{\mathrm{BG}}) = \frac{N^{N_{\mathrm{obs}}} e^{-N}}{N_{\mathrm{obs}}!} e^{-\frac{(N_{\mathrm{RD}} - \langle N_{\mathrm{RD}} \rangle)^2}{2\sigma_{\mathrm{RD}}^2}} e^{-\frac{(N_{\mathrm{BG}} - \langle N_{\mathrm{BG}} \rangle)^2}{2\sigma_{\mathrm{BG}}^2}}$$

$$\times \prod_{i=1}^{N_{\mathrm{obs}}} (N_{\mathrm{sig}} S(\vec{x_i}) + N_{\mathrm{RD}} R(\vec{x_i}) + N_{\mathrm{BG}} B(\vec{x_i}))$$

$N = N_{sig} + N_{RD} + N_{BG}$

N_{obs}: 解析範囲に見つかったイベント数

S, R, B: Probability Density Function

$\vec{x}$: $(E_\gamma, E_e, t_{e\gamma}, \theta_{e\gamma}, \phi_{e\gamma})$

signal、RD、BGの個数の最適値をfitにより決定する。

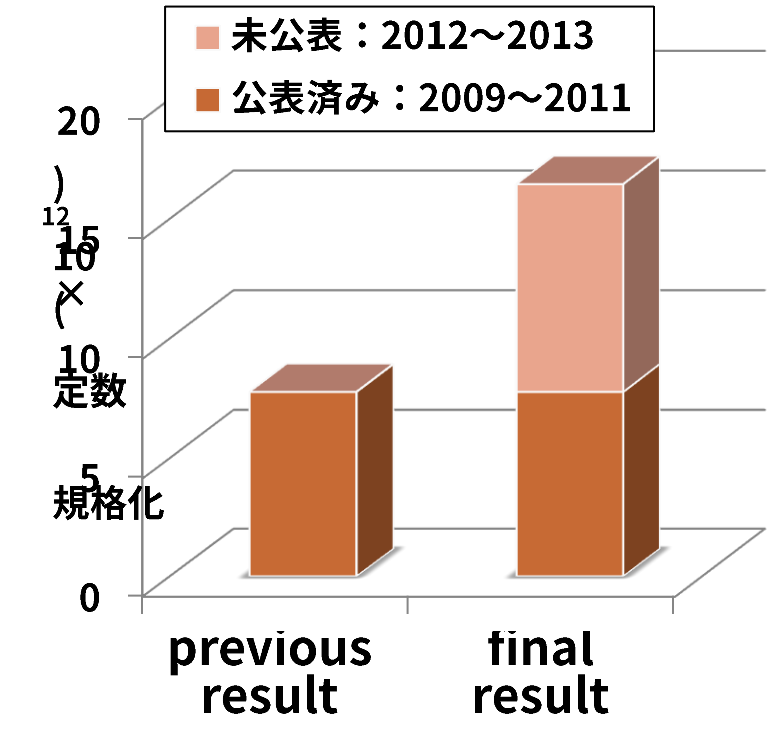
ToyMCを利用し、Feldman-Cousins の方法で制限範囲を設定する。

使用するデータ

MEGの物理run開始から、2013年8月のDAQ終了までの全データを使用する。
(公表済みデータも解析法が新しくなる。)

年度	μ粒子数 ($\times 10^{14}$)	規格化定数 ($\times 10^{12}$)
2009	0.65	1.2
2010	1.10	2.52
2011	1.85	4.05
09-11 計	3.6	7.77
2012	2.40	5.17
2013	1.40	3.51
12-13 計	3.8	8.68
総計	7.4	16.45

preliminary



逆数が
Single Event Sensitivity

前回、2013年公表の
感度 7.7×10^{-13} での探索に
使用したデータ量の**2.1倍**

前回からの発展

統計量の増加

前回使用したデータの2.1倍

AIF

γ線BGの一種
「陽電子の飛行中対消滅」
を検出して除去する

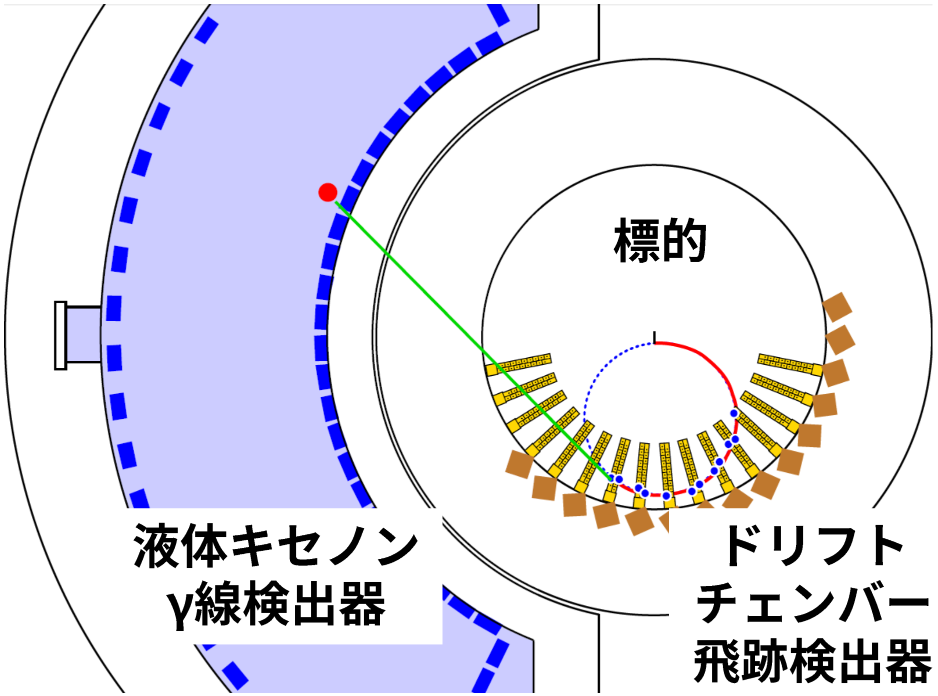
新測定磁場

以前は2006年に測定したデータを基にした磁場マップを使用していた　精度の高い磁場測定

ビーム強度依存性

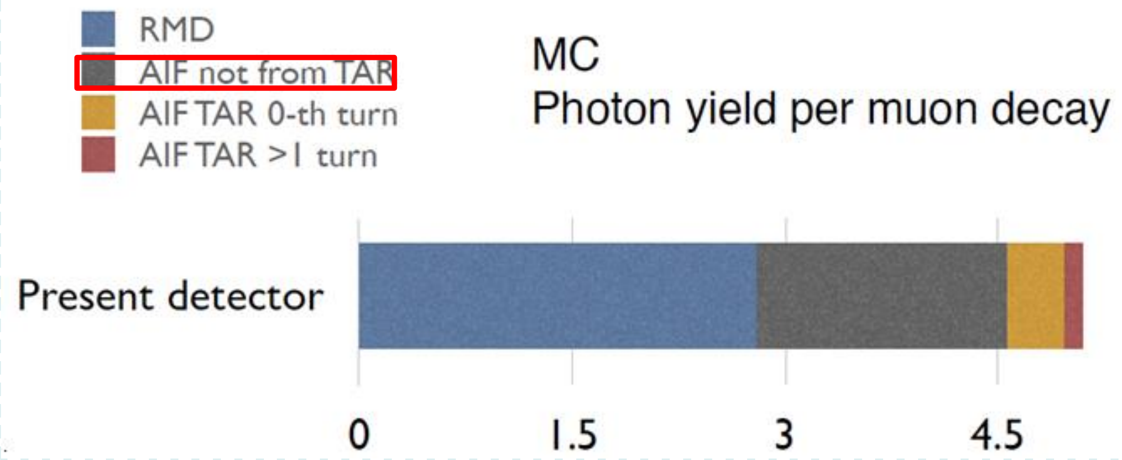
時期によりビーム強度が異なるため、予測されるバックグラウンドの変化を考慮に入れる

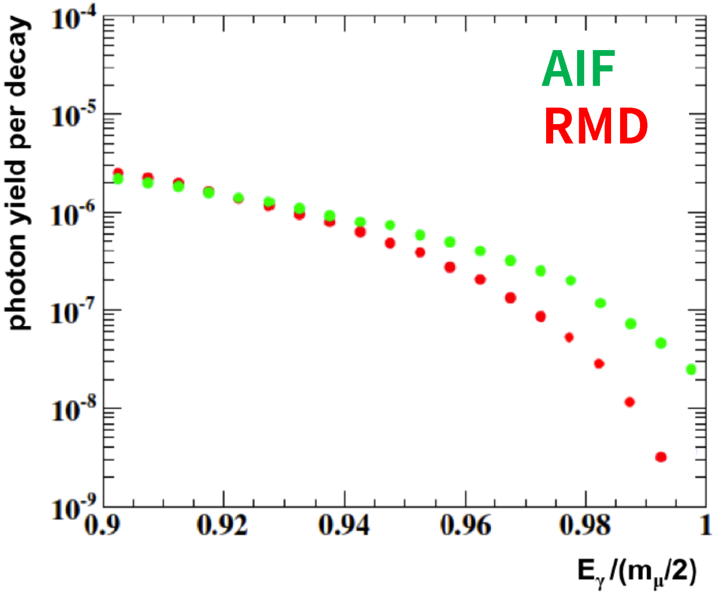
Annihilation In Flight



飛行中の陽電子が途中の物質
と対消滅してγを放出する
Accidental BG の原因の一つ

取り除き得るBGの比率は
解析範囲において約1/3
信号に近いエネルギー領域では
特に割合が高い

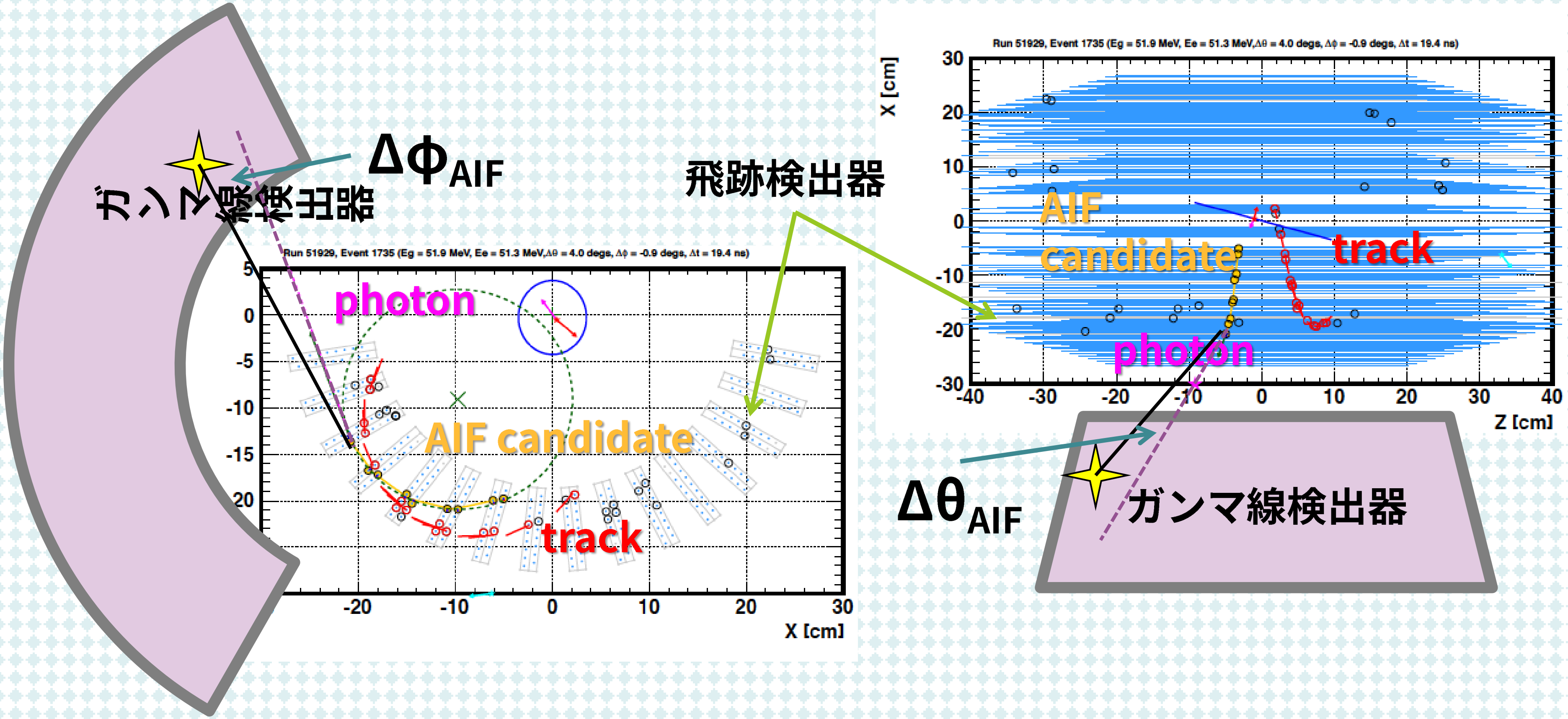




AIFの検出法

陽電子の飛跡が途中で消えているイベントが対消滅の候補。
直前の陽電子の運動量から予想される角度、時間に対応するγ線を探す。

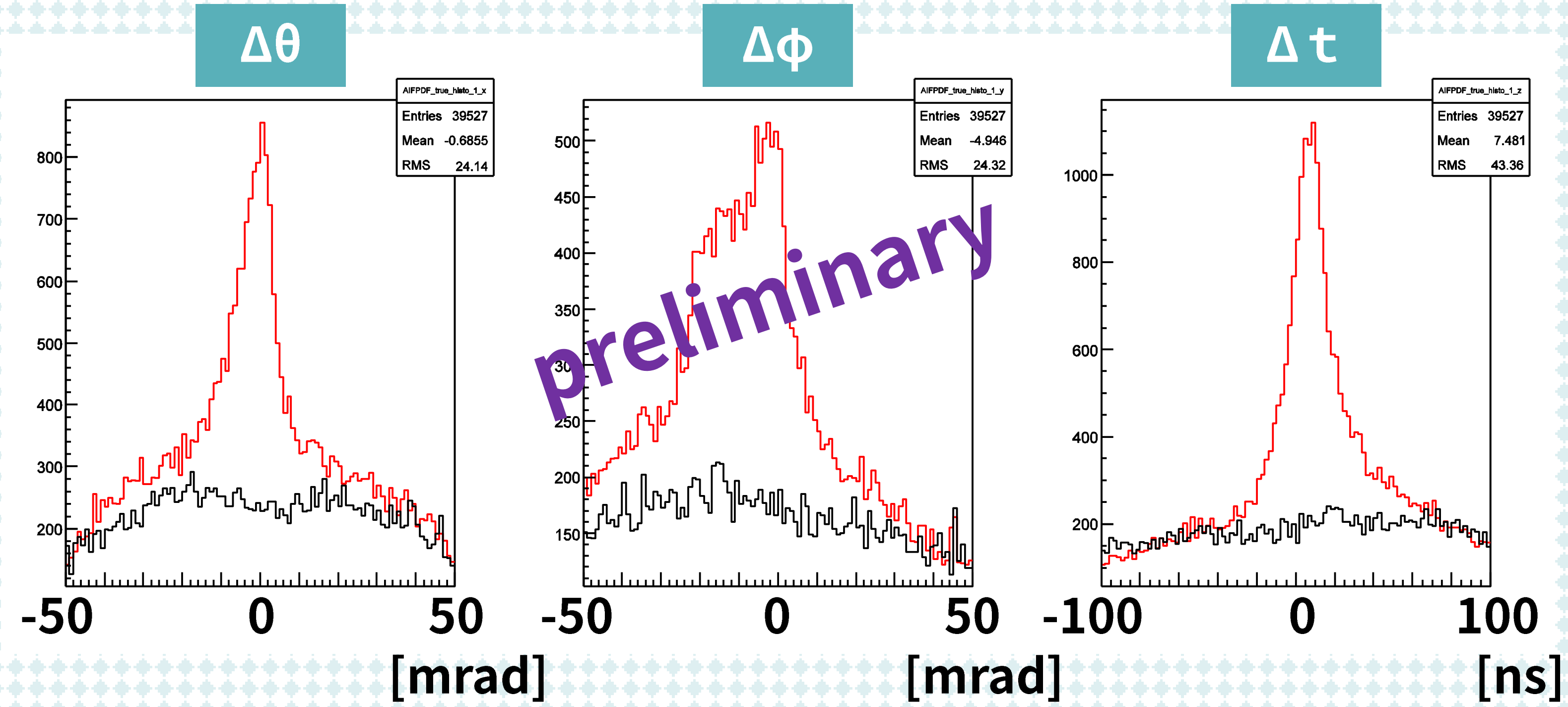
対応するガンマ線と陽電子のペアが
見つかったら予想との角度差・時間差、$\Delta\theta_{AIF}$、 $\Delta\phi_{AIF}$ 、Δt_{AIF}を記録する。



AIFの取扱い

赤：AIF候補イベント
黒：ランダムなBGの組み合わせ

全γのBGに対しAIF候補は85%。ピーク成分が14%、ベースが成分71%。



シグナル、RMD、BG、各PDFにAIF変数による部分を追加する。

$$F(E_\gamma, E_e, t_{e\gamma}, \theta_{e\gamma}, \phi_{e\gamma}) \rightarrow F(E_\gamma, E_e, t_{e\gamma}, \theta_{e\gamma}, \phi_{e\gamma}) \times G(\Delta\theta_{\mathrm{AIF}}, \Delta\phi_{\mathrm{AIF}}, \Delta t_{\mathrm{AIF}})$$

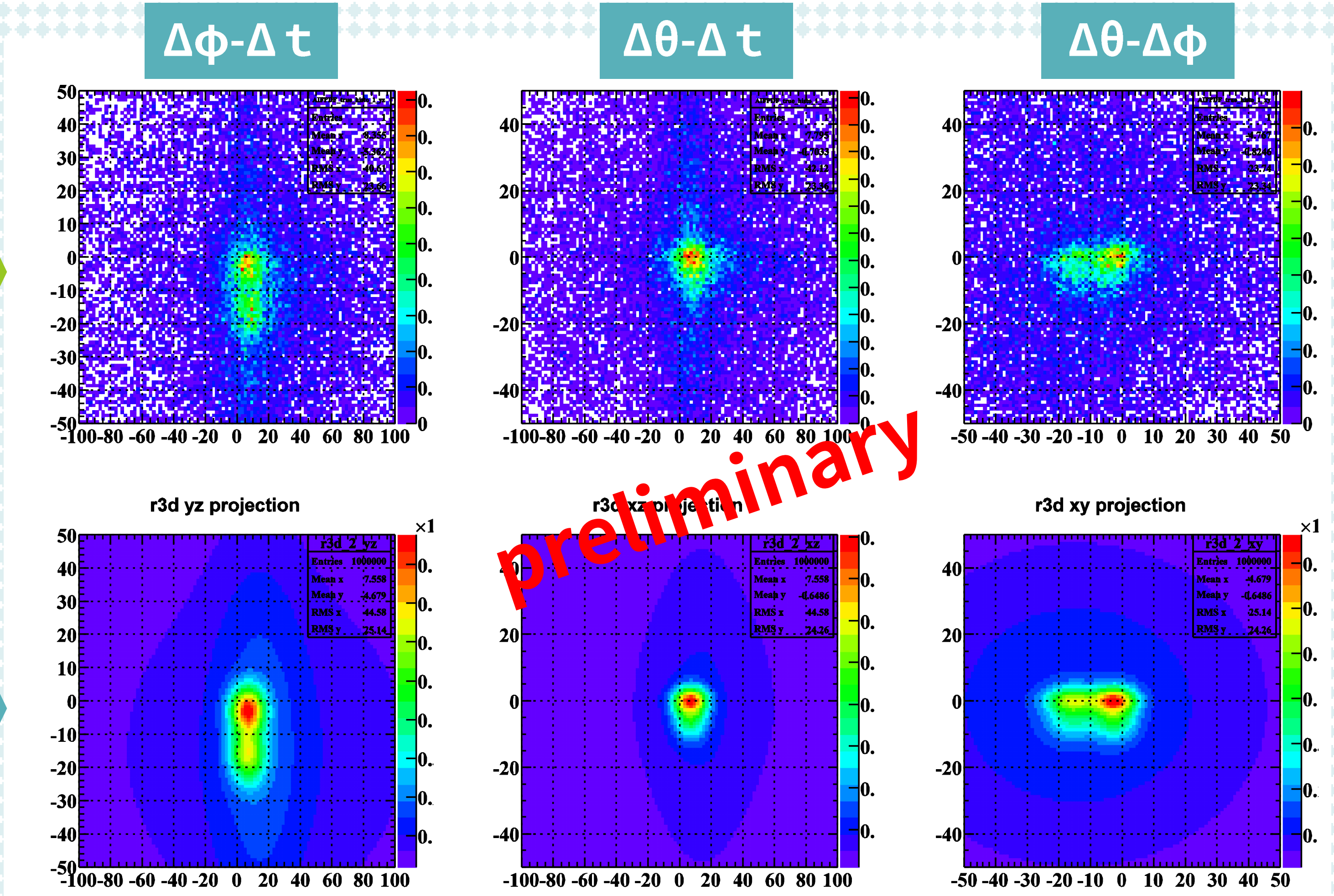
BG用 PDFはデータ(赤)から、RDとsignal はランダムデータ(黒)から作成。

AIF PDFの作成

観測されたAIF変数の3次元分布を再現する関数形を決め、フィッティングする。

観測値

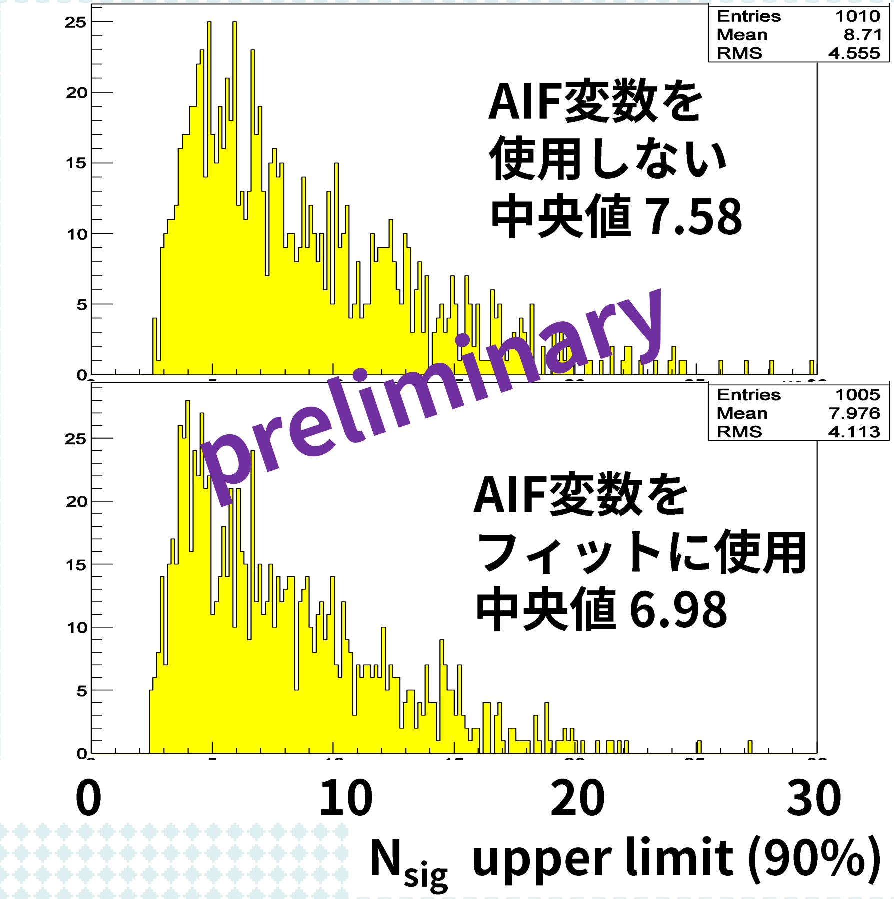
再構成
PDF

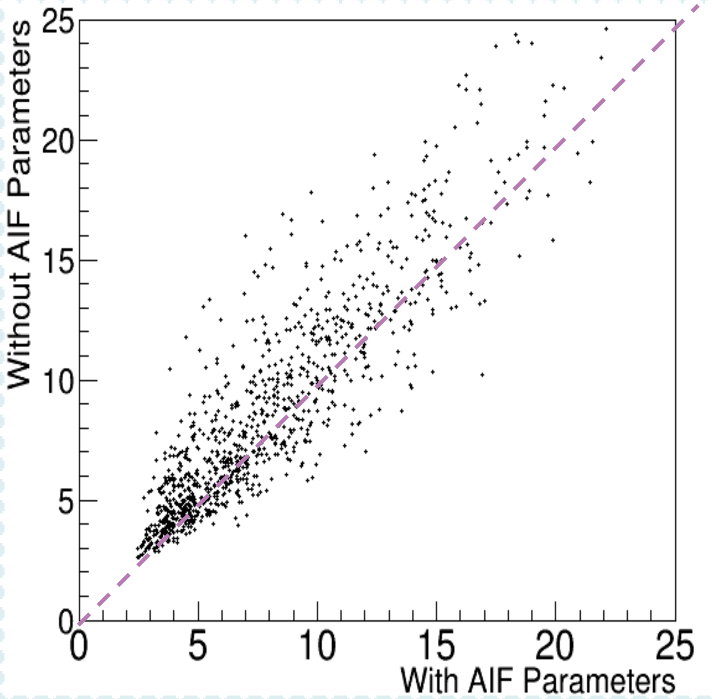


※他に、測定値を直接binning、1次元ヒストグラムで場合分けを行うなどの案も検討されている。最終版で何を採用するのかは未定。

AIF除去による感度の変化

2009-2013年の統計量を仮定したtoy-MCを生成し、
シグナル数の90%CL上限値を求めた。
AIF変数は先で作成したPDFを、生成とフィット共に使用した。
ただし他の変数のsystematic errorはここでは考慮していない。





AIF除去を行うことで
約8%感度が向上する

新磁場マッピング

これまでの磁場マップ
- MEG開始直前に測定
- 3次元の軸方向の不定性
- Z軸方向のみ採用Maxwell方程式で計算していた

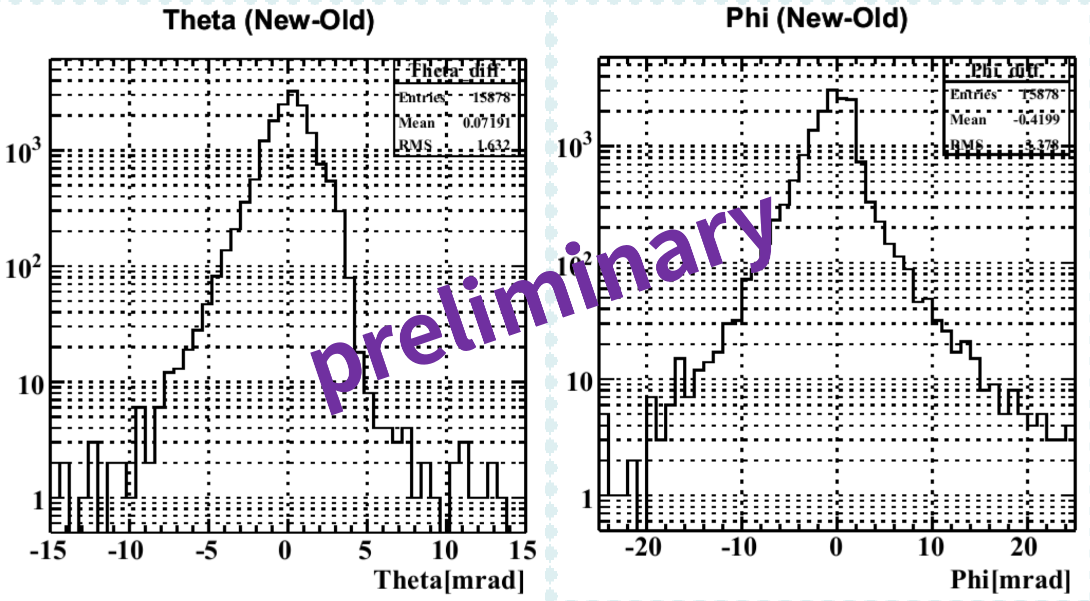
新磁場マップ

MEG-IIで分解能の向上した飛跡検出器のために相対誤差0.1%以下を目標として再測定をしている。

相対誤差0.2%
現状の分解能では問題ではない

陽電子パラメータの相関に不可解な振る舞いがある

既にsystematic uncertaintyとして計上してある



$\theta_{NEW}-\theta_{OLD}$
RMS 1.6mrad

$\theta_{NEW}-\theta_{OLD}$
RMS 5.4mrad

分解能よりも小さいため影響は小さそう

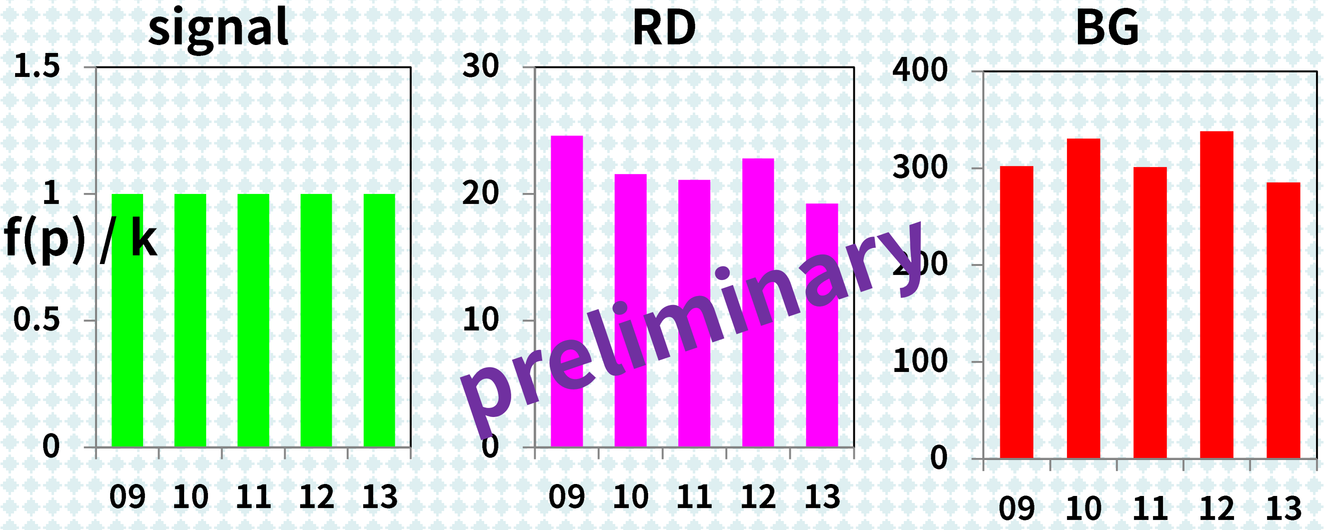
ビーム強度依存性を考慮したPDF

ビームの強度が時期により異なる。2012と2013は以前より高い
MEGの signal は強度に比例だが、accidental BG は2乗に比例する。

イベントレートのビーム強度依存性を入れるために
データ取得期間（年）をオブザーバブルとして追加

p_i: 期間

$$N_{\mathrm{sig}}\mathrm{S}(\vec{x_i}) + N_{\mathrm{RD}}\mathrm{R}(\vec{x_i}) + N_{\mathrm{BG}}\mathrm{B}(\vec{x_i})$$
$$\rightarrow N_{\mathrm{sig}}\mathrm{S}(\vec{x_i})\mathrm{f}_{\mathrm{sig}}(p_i) + N_{\mathrm{RD}}\mathrm{R}(\vec{x_i})\mathrm{f}_{\mathrm{RD}}(p_i) + N_{\mathrm{BG}}\mathrm{B}(\vec{x_i})\mathrm{f}_{\mathrm{BG}}(p_i))$$



解析の状況

各検出器

ガンマ線：キセノン検出器
陽電子：ドリフトチェンバー　タイミングカウンター

従来通りの較正・PDF用パラメータの抽出はだいたい完了

アライメントデータを解析中

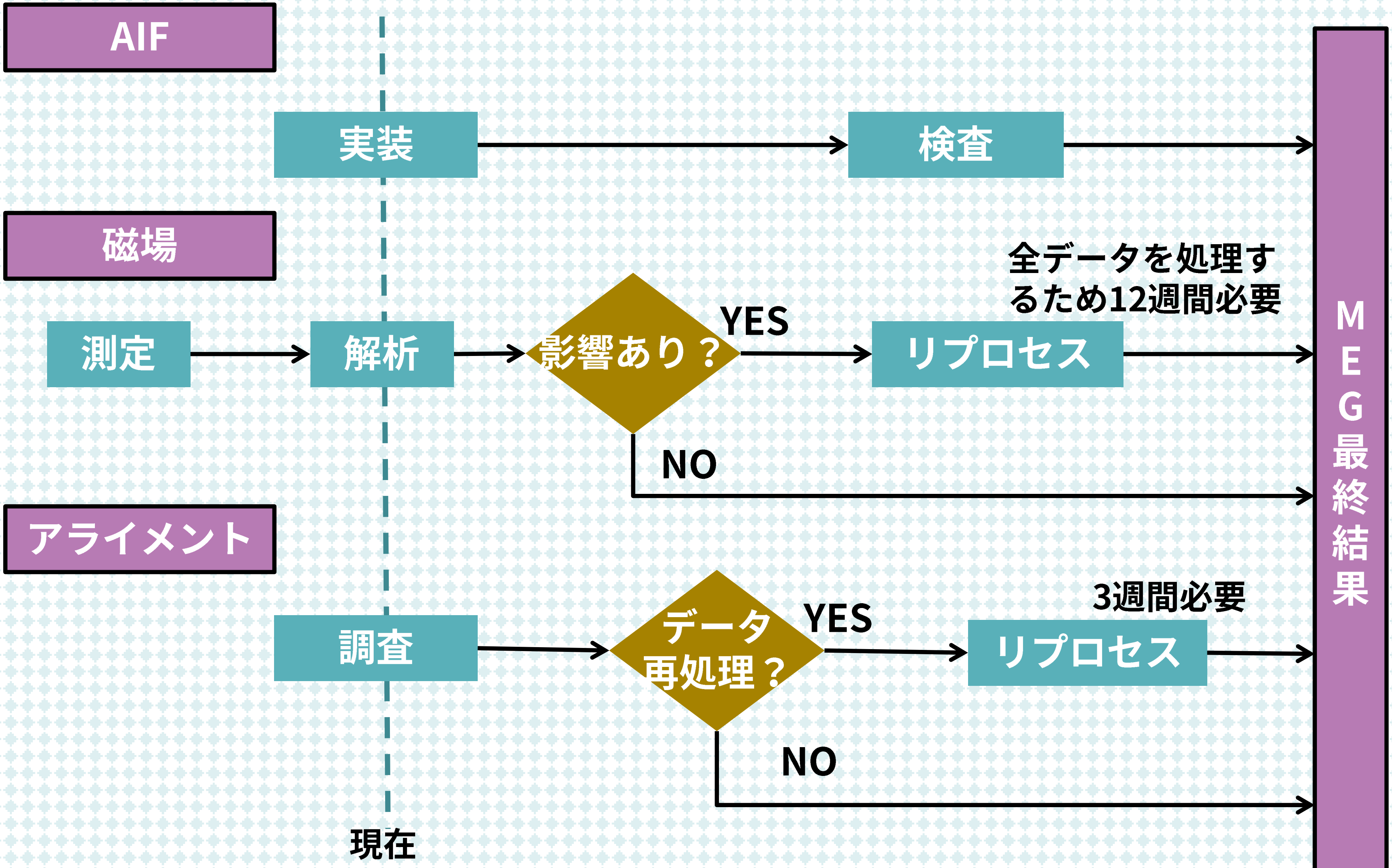
磁場測定

MEG-Iのための測定は完了、
陽電子解析性能が向上するようなら解析に導入

AIF

解析手法を検討中

今後の予定


AIF
実装
検査
磁場
全データを処理するため12週間必要
測定
解析
影響あり？
YES
リプロセス
NO
アライメント
3週間必要
調査
データ再処理？
YES
リプロセス
NO
現在
MEG最終結果

まとめ

MEG実験コラボレーションは
全データを使用する最終結果に向けて解析を進めている。

既に発表している2009-2011以前の結果
崩壊分岐比感度7.7×10^{-13}、上限値5.7×10^{-13}
を上回る探索が可能となる
- 2.1倍の統計量
- AIFを 除去することで8%感度が改善する
- より精密な磁場マップ
- ビーム強度依存性を考慮したPDF

統計量の向上のみを考慮すると感度は$\sim5\times10^{-13}$

遅くとも今年度中にMEG最終結果を出したい

ご清聴ありがとうございました