

MEG実験最新結果

大谷航

東京大学素粒子物理国際研究センター

将来計画小委員会タウンミーティング(コライダー物理)

2011年9月10日 名古屋大学

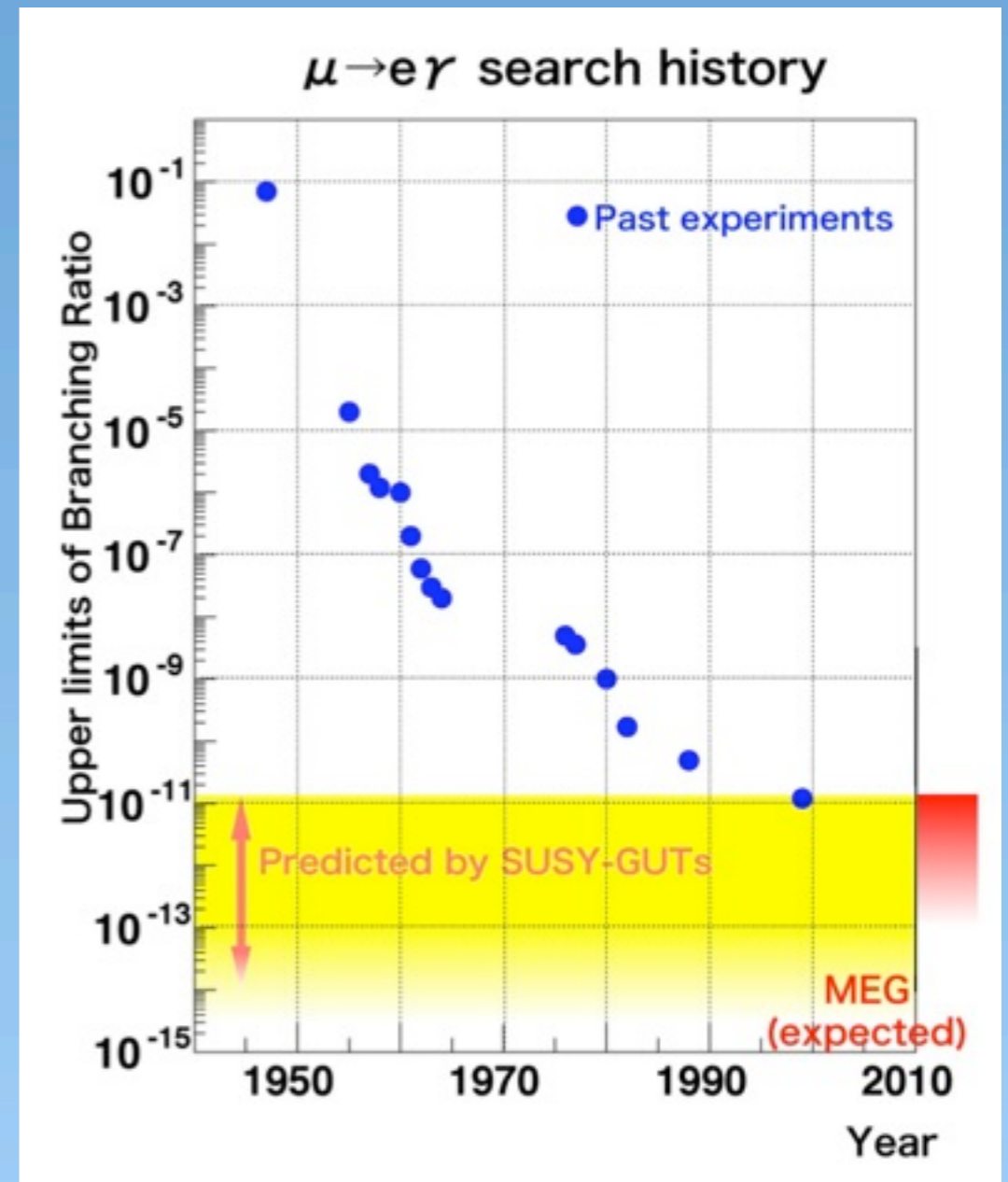
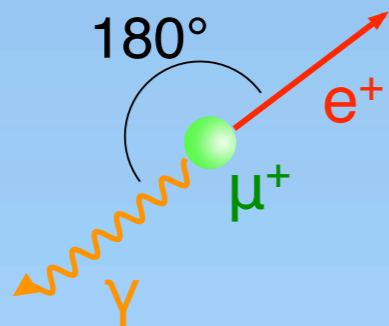
MEG実験

◎ $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$

- ◎ レプトンフレーバーを破る稀崩壊現象
- ◎ 標準理論では(ほぼ)禁止
- ◎ 多くの新物理がこれまでの実験上限値 (1.2×10^{-11} MEGA)に近い分岐比を予想
- ◎ 発見 = 新物理(BSM)の決定的証拠！

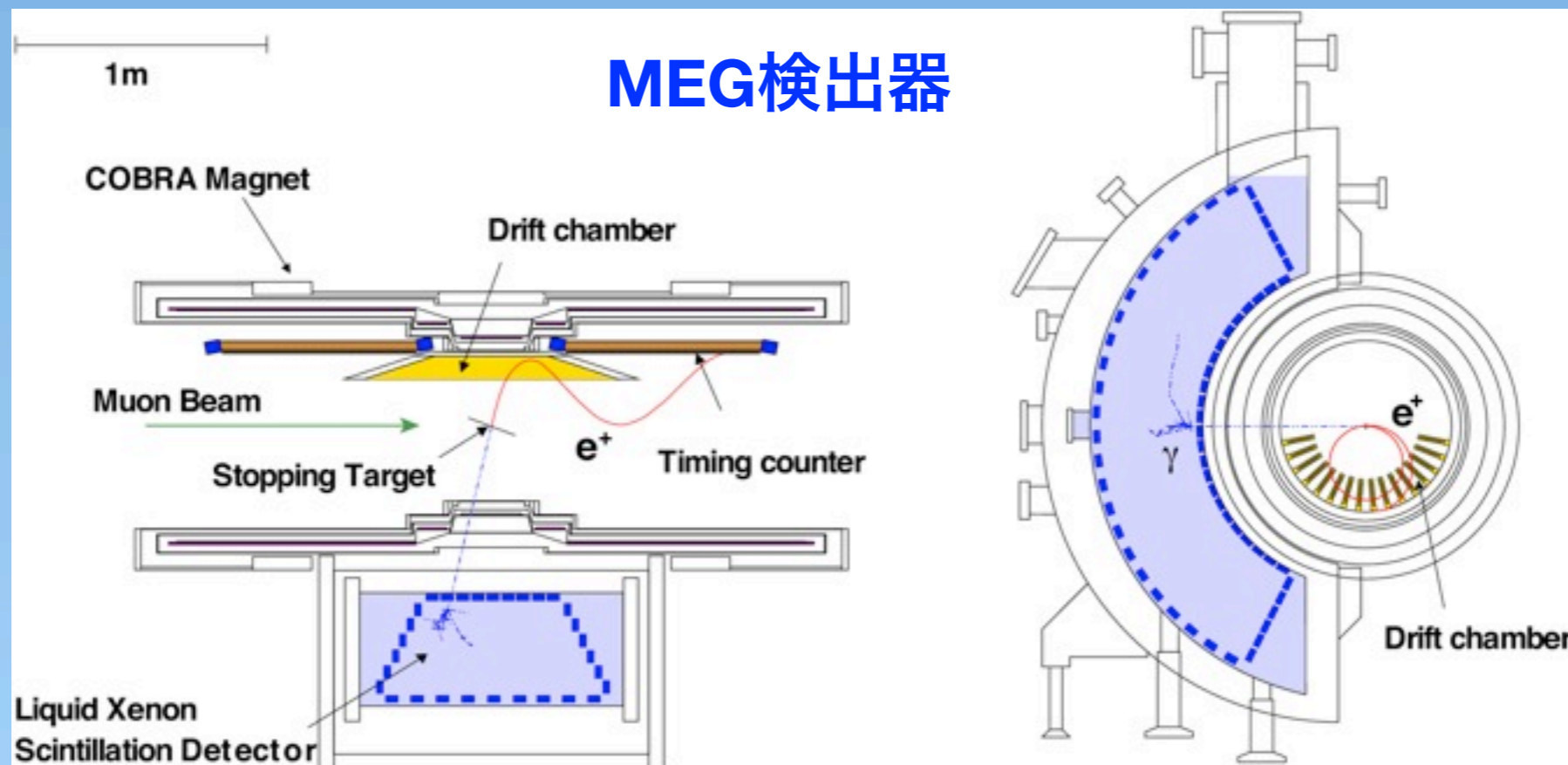
◎ MEG実験

- ◎ これまでにない高い感度で $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ を探索 (目標分岐比感度: $a \text{ few} \times 10^{-13}$)



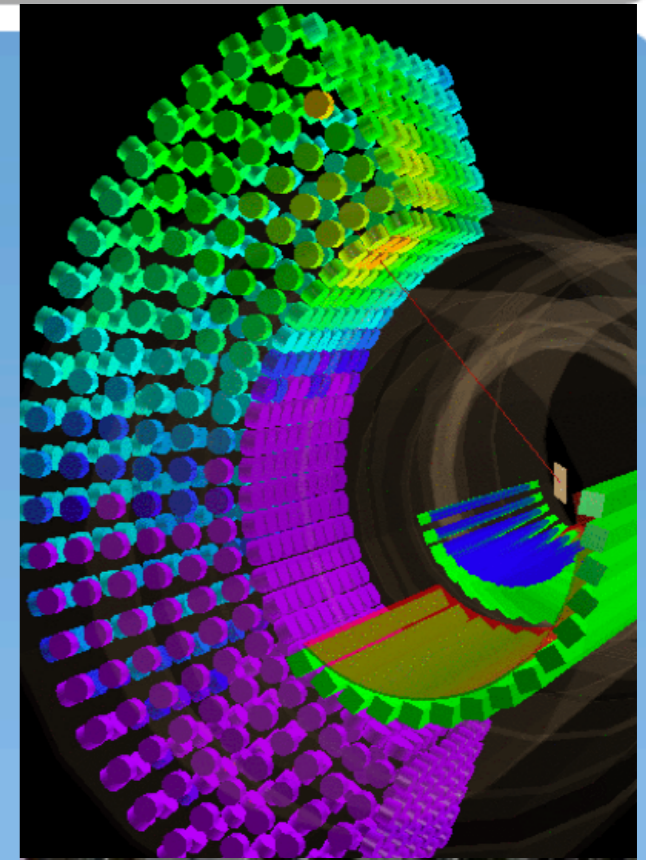
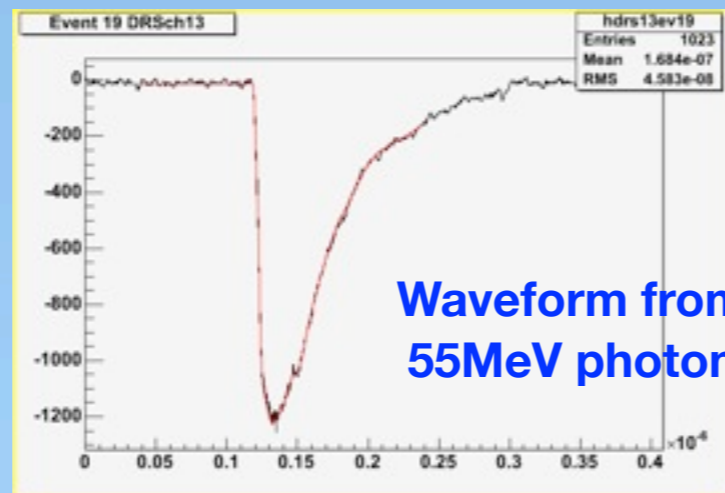
$\mu \rightarrow e\gamma$ 探索@MEG

- ◎ 世界最大強度のDC μ^+ ビーム (590MeV 1.3MW 陽子サイクロトロン@ポールシェラー研究所)
- ◎ 検出器
 - ◎ γ : 液体キセノンガンマ線検出器
 - ◎ e^+ : 勾配特殊磁場を用いた陽電子スペクトロメータ



液体キセノンガンマ線検出器

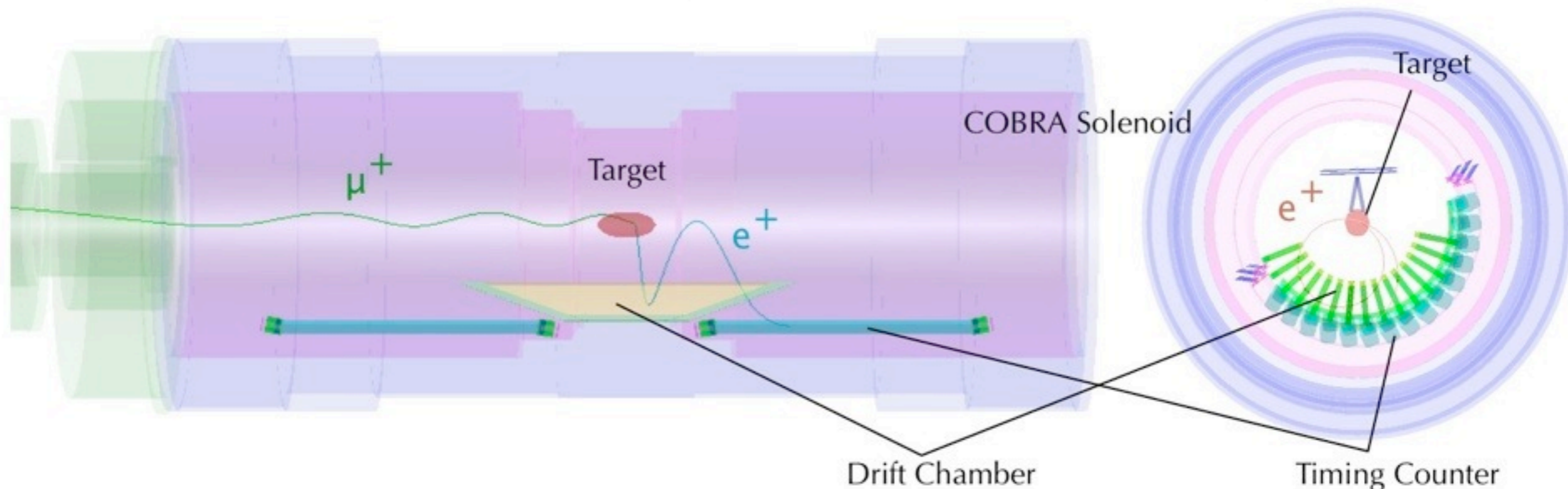
- ◎ 世界最大の液体キセノンガンマ線検出器
- ◎ 液体キセノン(900L)のシンチレーション光(VUV)を846本のPMTで検出
- ◎ ガンマ線事象の再構成
 - ◎ エネルギー: PMT光量の総和
 - ◎ 入射位置: 光量分布
 - ◎ 時間: PMT時間の平均
- ◎ 全てのPMTは波形デジタイザで読み出し(DRS4)
 - ◎ パイルアップ解析、particle ID



COBRAスペクトロメータ

- Lateral View -

- Cross-sectional View -



Solenoid

superconducting solenoid
gradient B-field (0.49-1.27 T)
very thin conductor and
cryostat wall ($0.2X_0$)

Drift Chamber

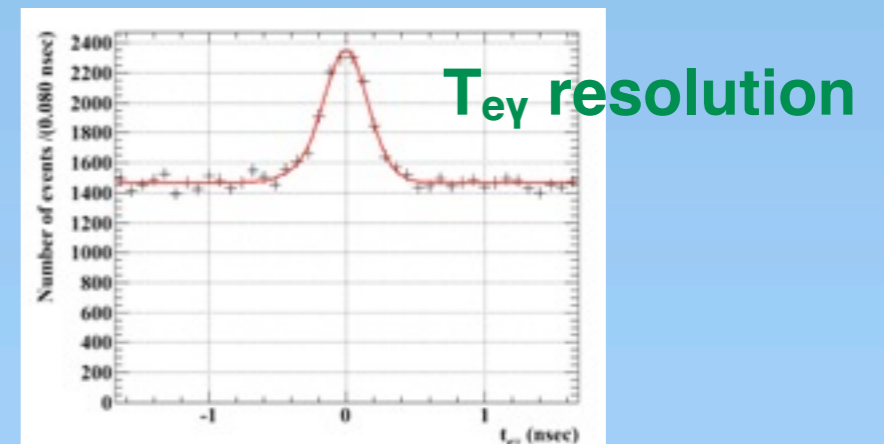
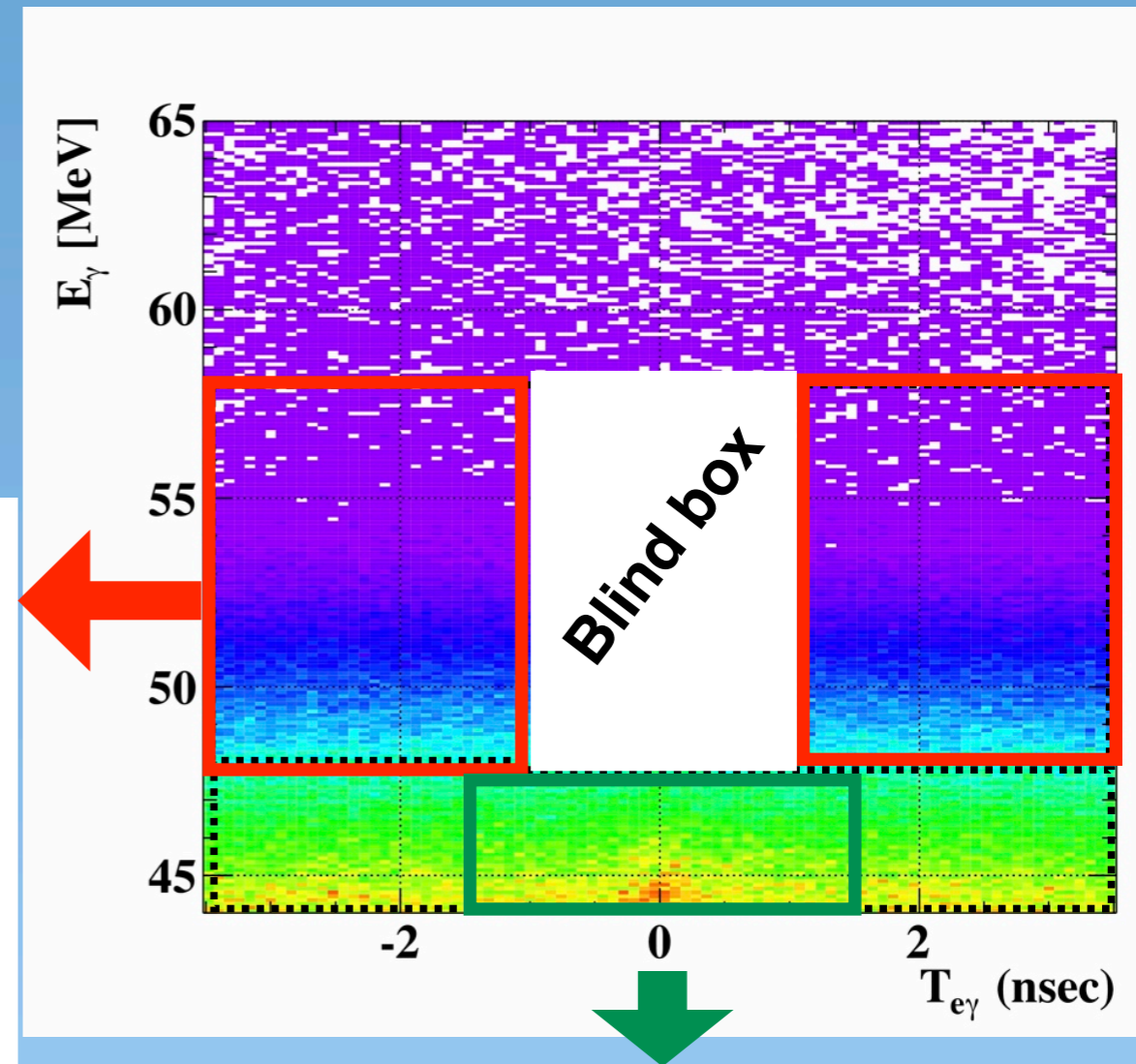
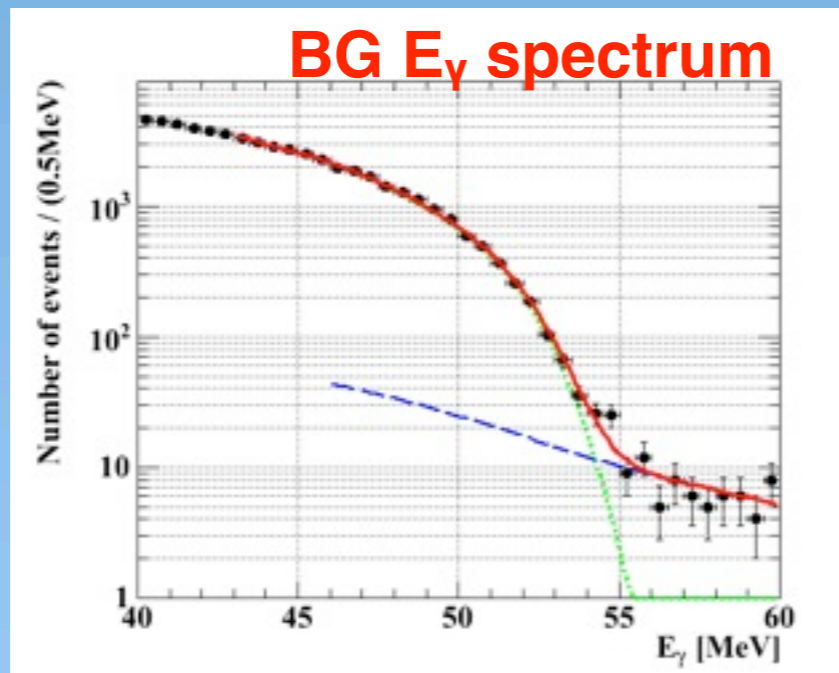
segmented radially (16 sectors)
helium:ethane (50:50)
opened-frame
very thin cathode foil with pads
 $2 \times 10^{-3} X_0$ along positron trajectory

Timing Counter

2-layers of scintillators
- scintillator bars (outer)
- scintillator fibers (inner)

MEG物理解析

- ブラインド解析
- Hidden box on ($T_{e\gamma}$, E_γ)
- サイドバンドで解析最適化、BG評価
 - Accidental: $T_{e\gamma}$ -sideband
 - Radiative muon decay: E_γ -sideband



MEG物理解析

◎ Likelihood解析による信号数推定

- ◎ Three event types: **signal, radiative μ decay (RMD), accidental BG**
- ◎ Observables x_i : $E_\gamma, E_e, T_{e\gamma}, \theta_{e\gamma}, \Phi_{e\gamma}$
- ◎ Fit parameters: $N_{\text{signal}}, N_{\text{RMD}}, N_{\text{BG}}$

◎ PDF

- ◎ Signal: measured detector response function
- ◎ RMD: theoretical spectrum convoluted with measured detector response
- ◎ BG: measured BG spectrum

$$\begin{aligned} & \mathcal{L}(N_{\text{sig}}, N_{\text{RMD}}, N_{\text{BG}}) \\ &= \frac{e^{-N}}{N_{\text{obs}}!} e^{-\frac{(N_{\text{RMD}} - \langle N_{\text{RMD}} \rangle)^2}{2\sigma_{\text{RMD}}^2}} e^{-\frac{(N_{\text{BG}} - \langle N_{\text{BG}} \rangle)^2}{2\sigma_{\text{BG}}^2}} \prod_{i=1}^{N_{\text{obs}}} (N_{\text{sig}} S(\vec{x}_i) + N_{\text{RMD}} R(\vec{x}_i) + N_{\text{BG}} B(\vec{x}_i)) \end{aligned}$$

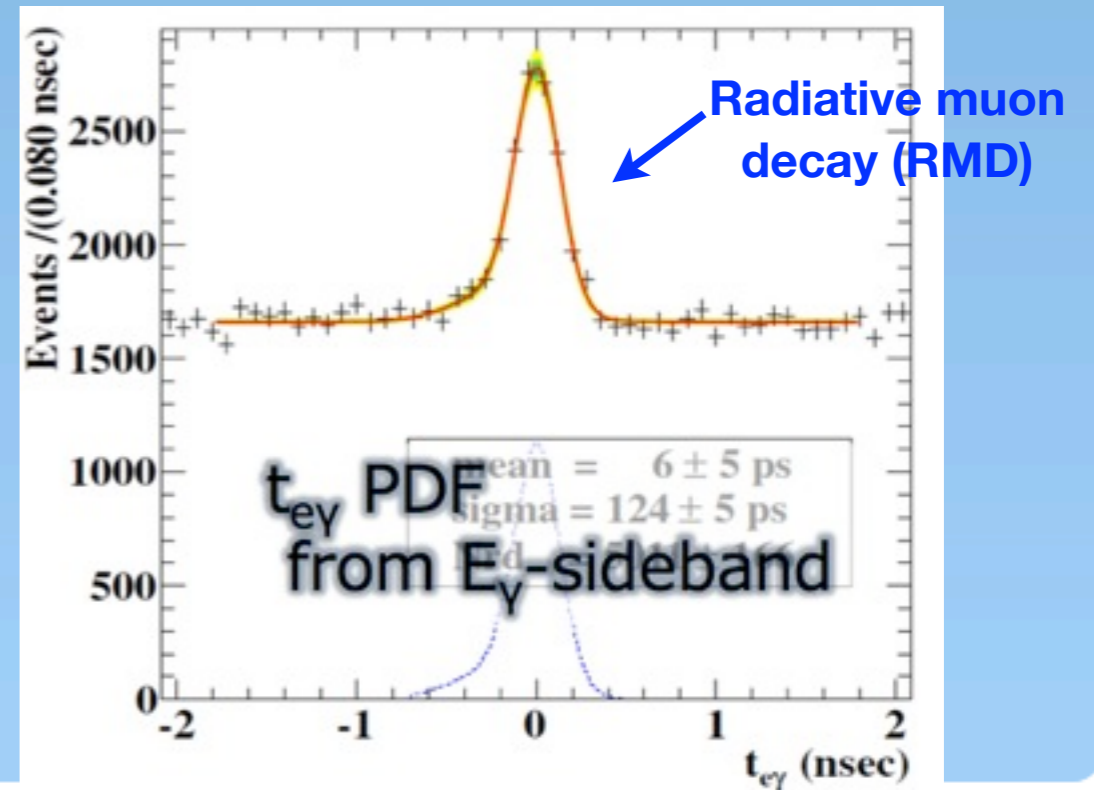
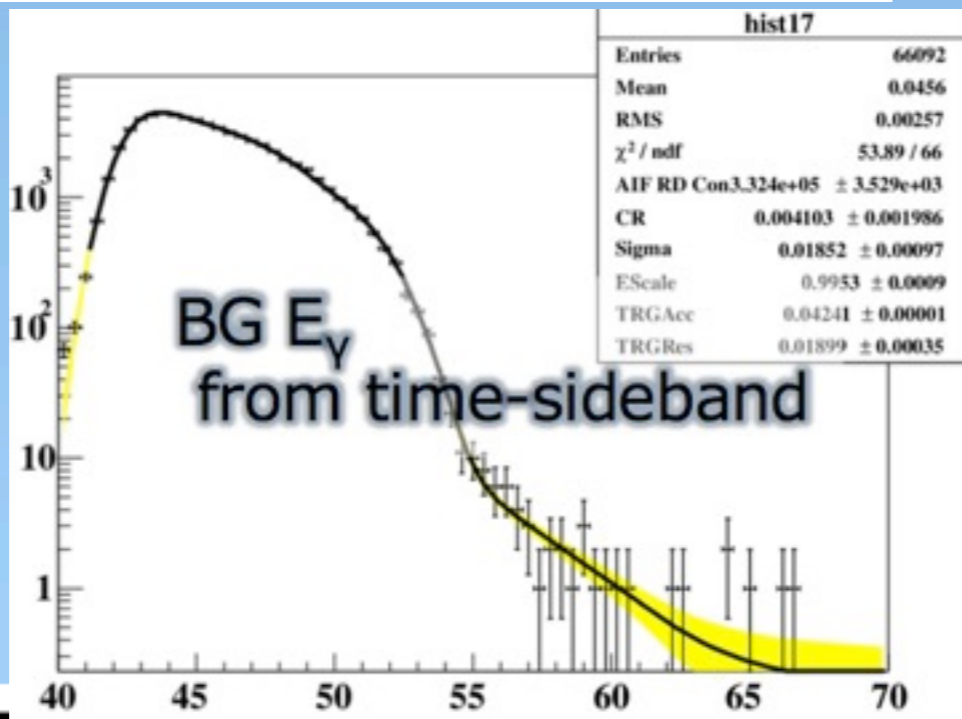
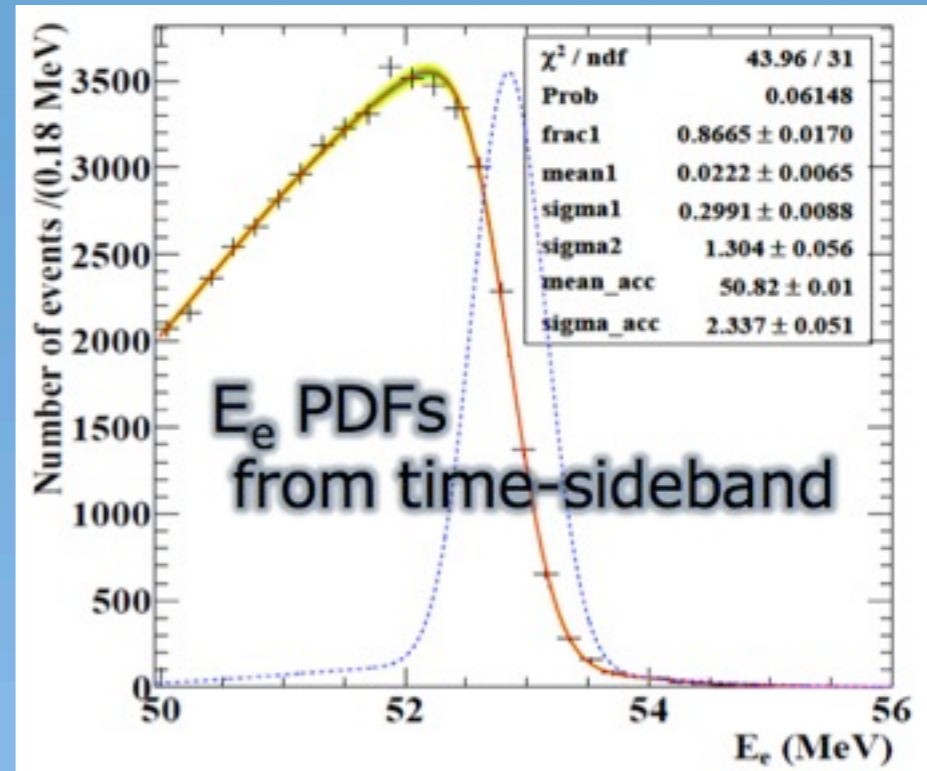
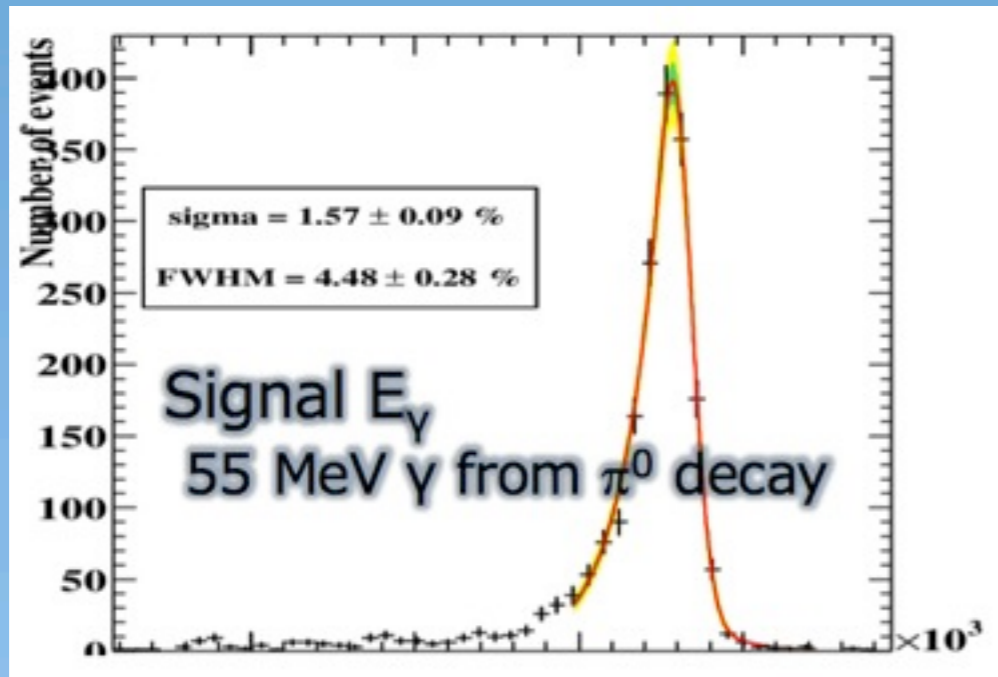
◎ Confidence interval

- ◎ Feldman-Cousins method with profile likelihood ratio ordering

$$\lambda_p(N_{\text{sig}}) = \frac{\mathcal{L}(N_{\text{sig}}, \hat{\hat{N}}_{\text{RMD}}(N_{\text{sig}}), \hat{\hat{N}}_{\text{BG}}(N_{\text{sig}}))}{\mathcal{L}(\hat{N}_{\text{sig}}, \hat{N}_{\text{RMD}}, \hat{N}_{\text{BG}})}$$

PDFs

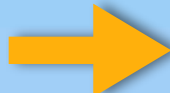
- PDFはほとんどすべて測定データから
- 事象ごとに異なるPDFが使える



MEG実験のこれまで

- **1999: 実験提案、承認 @ PSI**
- **2006: 陽電子スペクトロメータのコミッショニング**
- **2007: 全検出器を用いた試験的物理データ取得**
- **2008: 最初の本格的物理データ取得**
- **2009: 物理データ取得 (DAQ time~35日)**
 - Run2008解析結果発表@LP2009 ($B < 2.8 \times 10^{-11}$ (90% C.L.))
- **2010: 物理データ取得 (DAQ time ~56日)**
 - run2009の二倍の統計量
 - Run2009暫定解析結果を発表 @ICHEP2010 $B < 1.5 \times 10^{-11}$ (90% C.L.)
- **2011: 物理データ取得 (最初の長期ラン DAQ ~104日(見込み))**
 - Run2009+2010 解析結果発表 @EPS-HEP2011 (PRL掲載予定)

MEG実験のこれまで

- ◎ **1999: 実験提案、承認 @ PSI**
- ◎ **2006: 陽電子スペクトロメータのコミッショニング**
- ◎ **2007: 全検出器を用いた試験的物理データ取得**
- ◎ **2008: 最初の本格的物理データ取得**
- ◎ **2009: 物理データ取得 (DAQ time~35日)**
 - ◎ Run2008解析結果発表@LP2009 ($B < 2.8 \times 10^{-11}$ (90% C.L.))
- ◎ **2010: 物理データ取得 (DAQ time ~56日)**
 - ◎ run2009の二倍の統計量
 - ◎ Run2009暫定解析結果を発表 @ICHEP2010 $B < 1.5 \times 10^{-11}$ (90% C.L.)
- ◎ **2011: 物理データ取得 (最初の長期ラン DAQ ~104日(見込み))**
 - ◎  Run2009+2010 解析結果発表 @EPS-HEP2011 (PRL掲載予定)

MEG物理結果アップデート

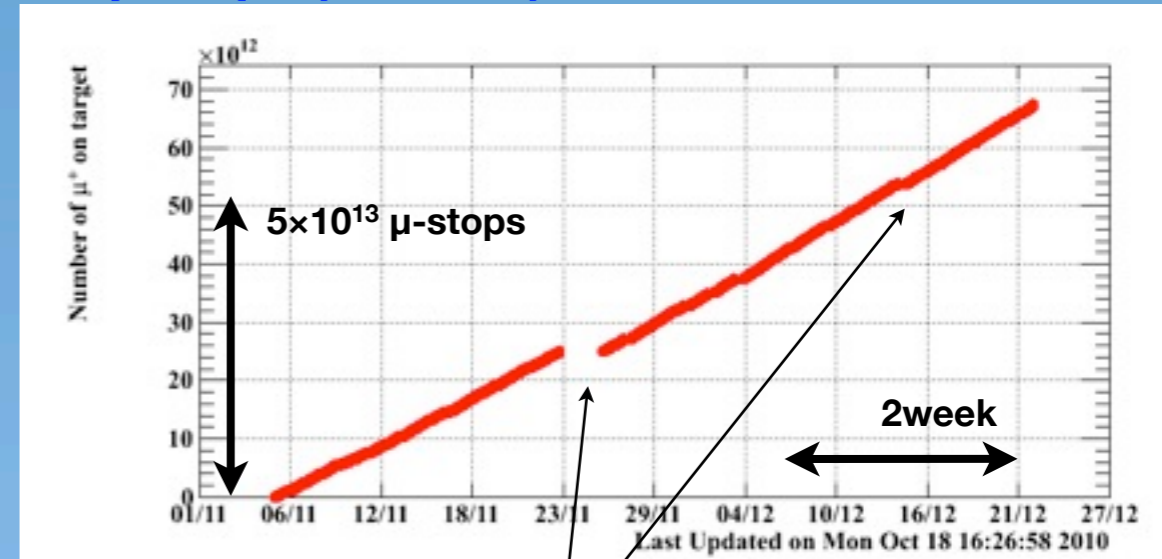
- ◎ 昨年夏のrun2009解析結果(暫定)発表(ICHEP2010)以来の改良点
 - ◎ Run2010データを追加 (2010年は2009年統計量の2倍)
 - ◎ 検出器アラインメントの改良
 - ◎ 陽電子変数間相関のより詳細な理解
 - ◎ 磁場マップの改良
 - ◎ Likelihood解析における統計手法の改良
- ◎ 今回、2009+2010のデータを合わせて改良した方法で解析

Run 2009/2010

Run2009

- DC検出効率の改善(HVトリップ問題を解決)
- 安定した液体キセノン検出器の発光量
- 物理データ取得 ~43 days
- μ -stop rate: $2.9 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$
- Total μ -stop: 6.5×10^{13}

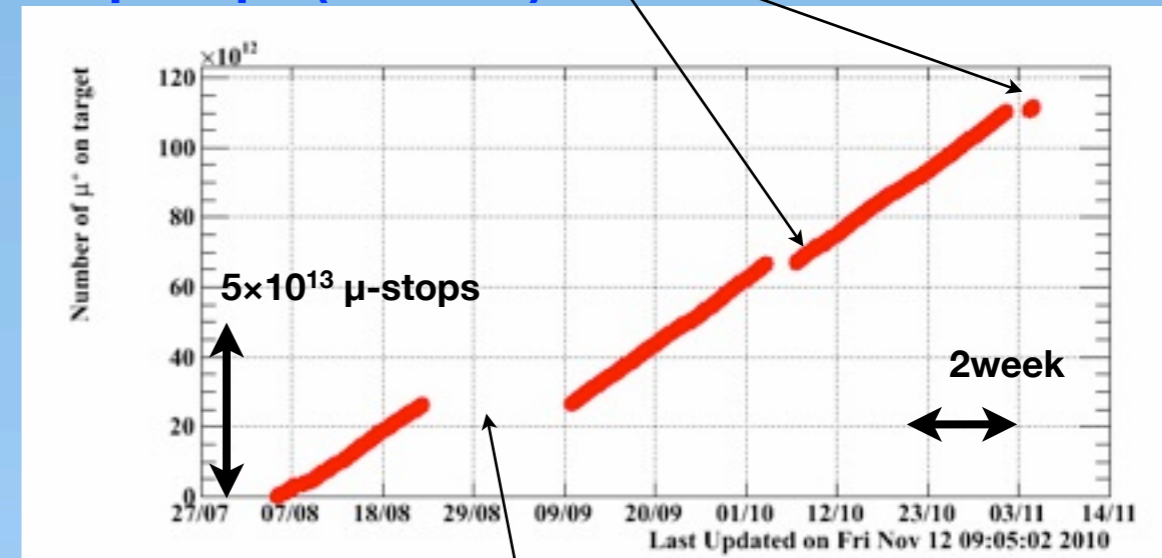
of μ stops (run2009)



Run2010

- μ 停止分布の最適化
- 波形デジタイザの時間分解性能の改善
- ビーム輸送ソレノイドの故障により予定より早くランが終了
- 物理データ取得 ~67 days
- μ -stop rate: $2.9 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$
- Total μ -stop: 1.1×10^{14}

of μ stops (run2010)



Accelerator maintenance

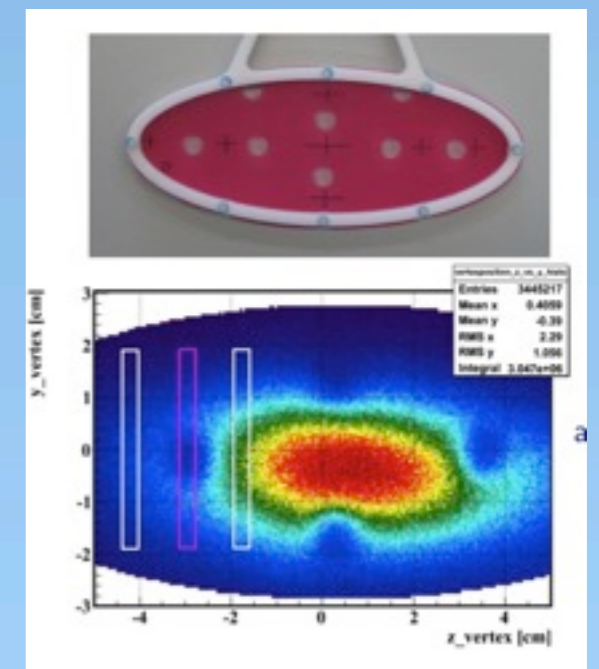
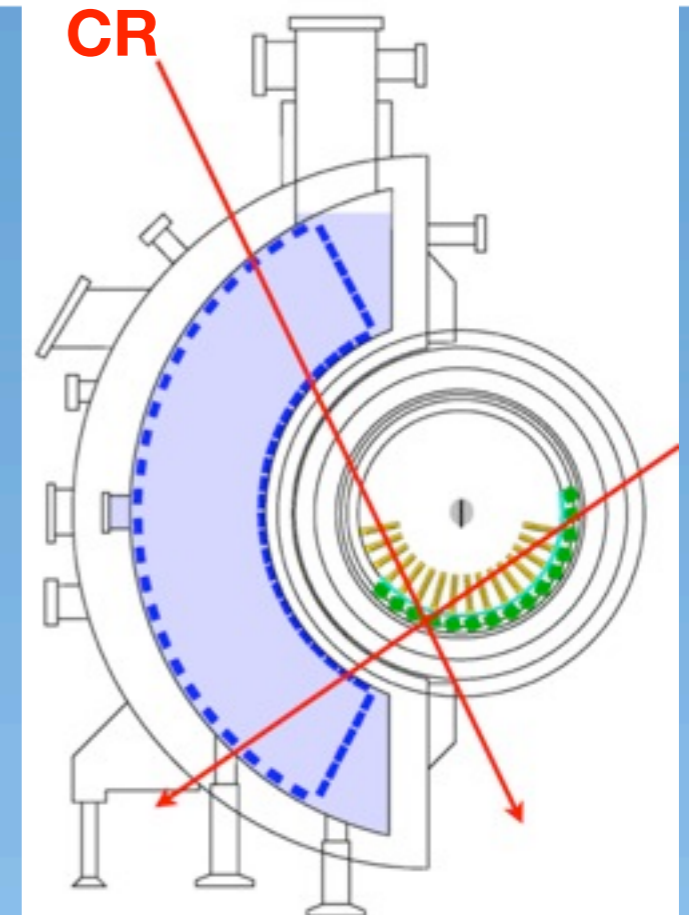
CEX calibration run

←データ統計量はrun2009の二倍

検出器アライメント

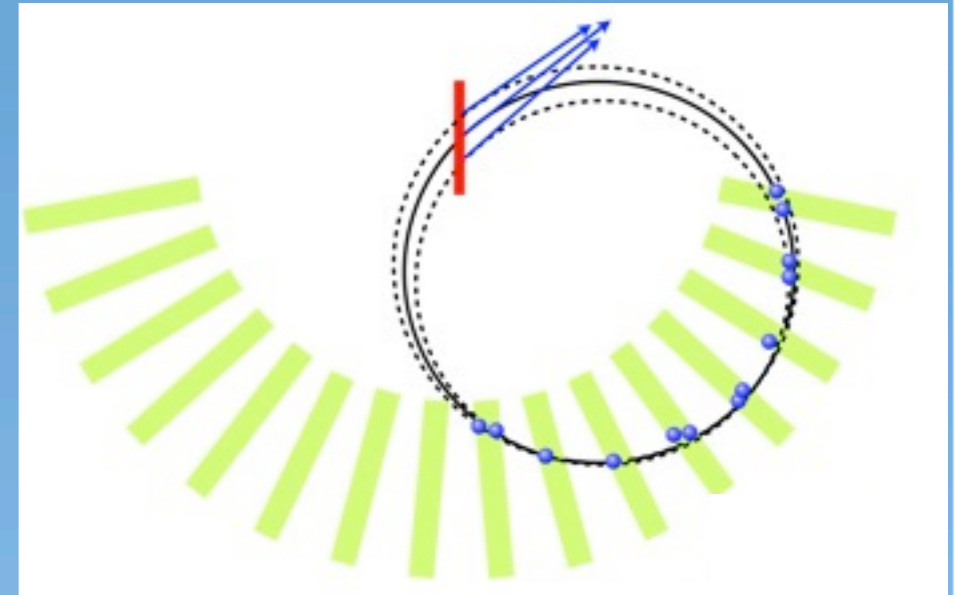
- ◎ **LXe (γ detector), DC (e^+ tracker) 相対アライメント**
- ◎ MEG検出器角度較正の問題点：適当な角度の較正源がない
 - ◎ さまざまな方法でアライメントを測定
 - ◎ 光学測量、宇宙線、 γ 線(p- γ reaction、AmBe)
- ◎ **DCアライメント**
 - ◎ 光学測量
 - ◎ 宇宙線を用いた新しいアライメント法を導入
 - ◎ 初期値に対してより安定なアライメントを採用 (Millipede法)
- ◎ ターゲットホールの再構成位置を用いたターゲットアライメント

→分解能、系統誤差を改善



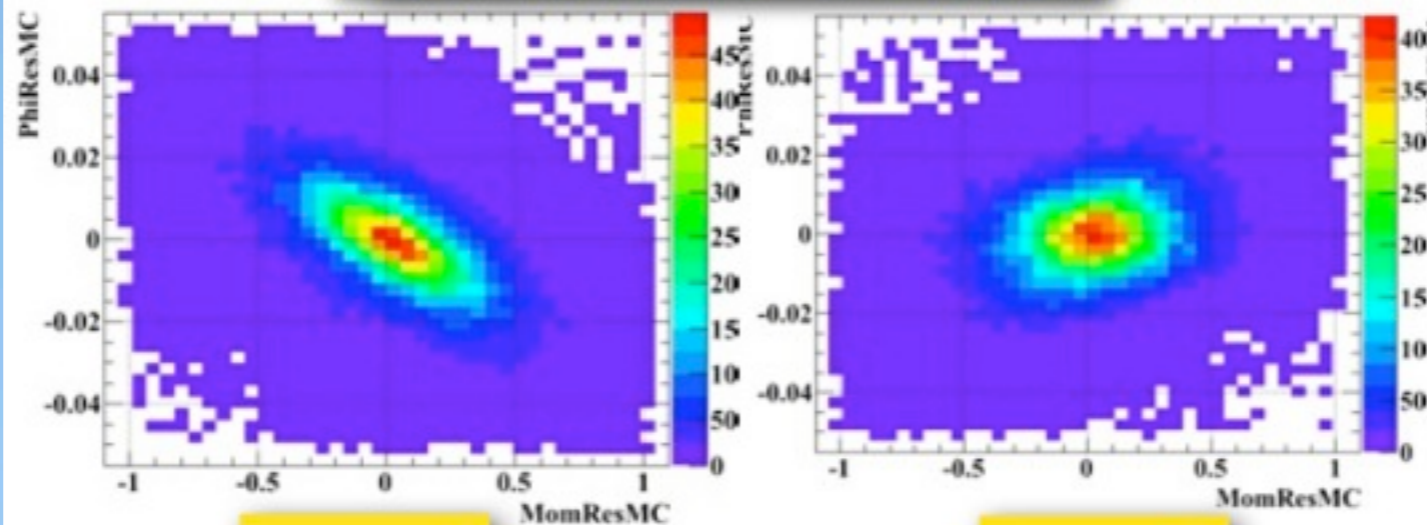
陽電子測定変数相関

- ◎ ターゲット平面上での拘束条件により再構成した運動量、角度の間に相関が生じる。
- ◎ ほとんどの相関はデータで見積もることができる。
(Two turn method: 一つのトラック中の二つのトラックセグメントを独立に再構成して差をみる)
- ◎ より詳細に相関をlikelihood解析に取り入れた。



$\Delta\Phi - \Delta E$

MC : Observed - True



$\varphi > 0$

$\varphi < 0$

Performance Summary

	Run2009	Run2010
γ energy	1.9% (w>2cm)	1.9% (w>2cm)
γ position	5mm (u,v) / 6mm (w)	5mm (u,v) / 6mm (w)
γ timing	96ps	67ps
e^+ mom.	0.59 (core)	0.61 (core)
e^+ angle	6.7mrad (Φ ,core), 9.4mrad (θ)	7.2mrad (Φ ,core), 11.0mrad (θ)
e^+ timing	107ps	107ps
γ - e^+ timing	146ps (core)	122ps (core)
γ - e^+ angle	13.1mrad(Φ), 14.5mrad(θ)	14.0mrad(Φ), 17.1mrad(θ)
Vertex position	1.5mm(Z), 1.1mm(Y,core)	2.0mm(Z), 1.1mm(Y,core)
Trigger eff.	91	92
μ stop rate	$2.9 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$	$2.9 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$
DAQ time	35days	56days
Total μ stops	6.5×10^{13}	1.1×10^{14}

Resolution in sigma

Performance Summary

	Run2009	Run2010
γ energy	1.9% (w>2cm)	1.9% (w>2cm)
γ position	5mm (u,v) / 6mm (w)	5mm (u,v) / 6mm (w)
γ timing	96ps	67ps
e^+ mom.	0.59 (core)	0.61 (core)
e^+ angle	6.7mrad (Φ ,core), 9.4mrad (θ)	7.2mrad (Φ ,core), 11.0mrad (θ)
e^+ timing	107ps	107ps
γ - e^+ timing	146ps (core)	122ps (core)
γ - e^+ angle	13.1mrad(Φ), 14.5mrad(θ)	14.0mrad(Φ), 17.1mrad(θ)
Vertex position	1.5mm(Z), 1.1mm(Y,core)	2.0mm(Z), 1.1mm(Y,core)
Trigger eff.	91	92
μ stop rate	$2.9 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$	$2.9 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$
DAQ time	35days	56days
Total μ stops	6.5×10^{13}	1.1×10^{14}

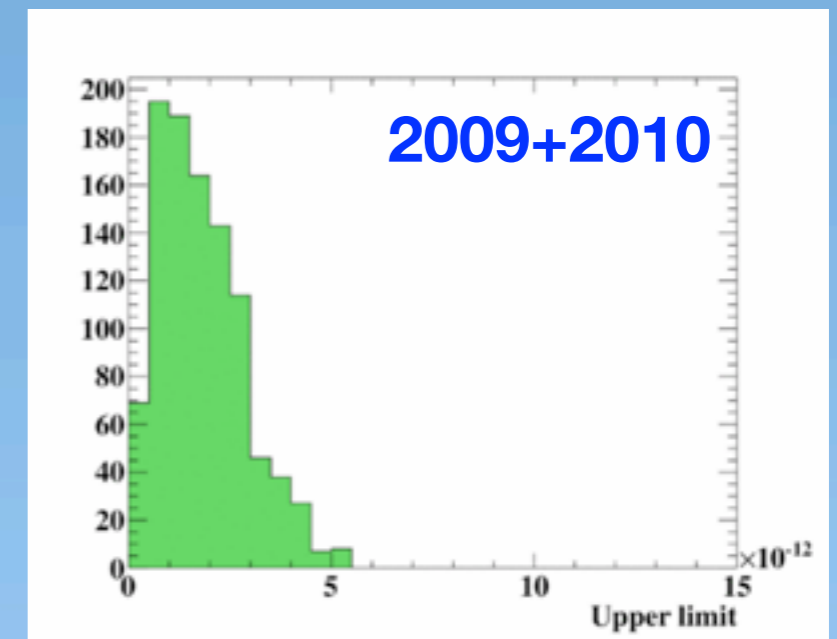
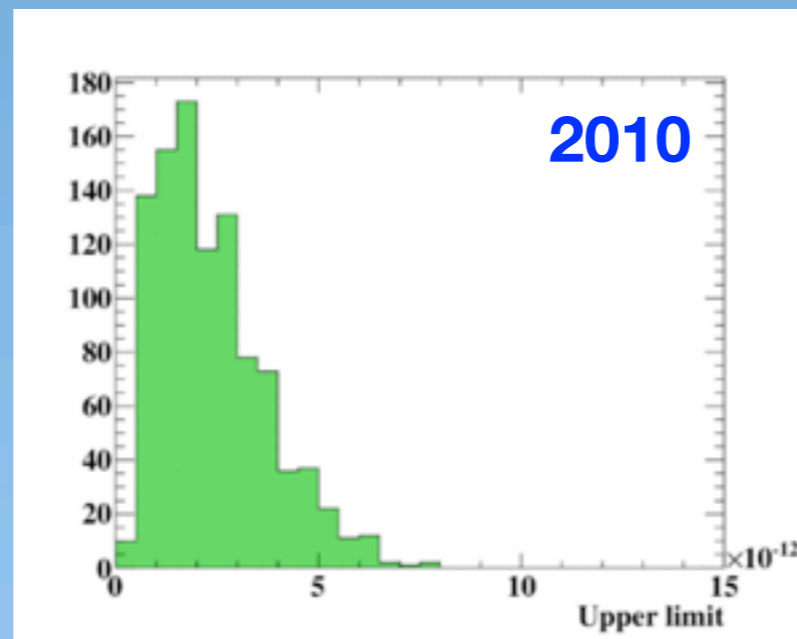
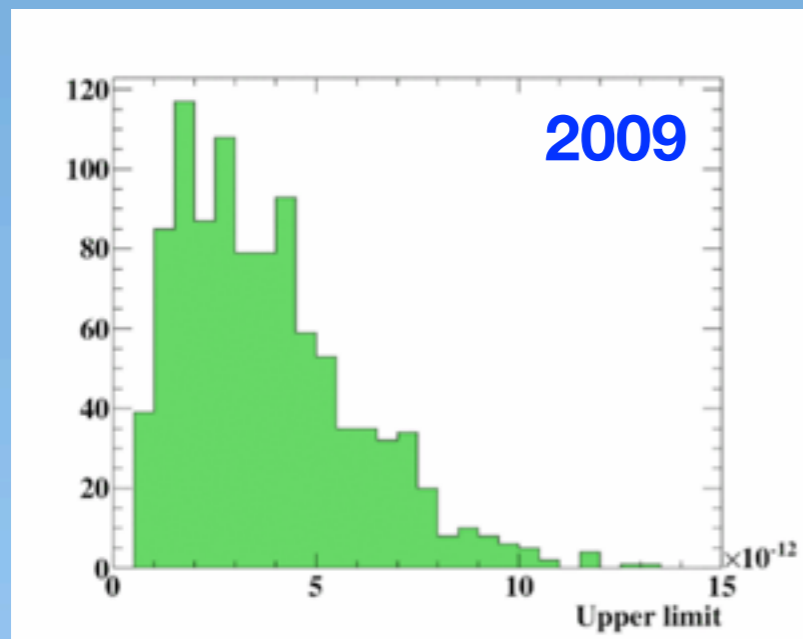
larger DC noise in 2010

Improved time-jitter in waveform digitizer

Resolution in sigma

探索感度

- ◎ **実験の感度** = サイドバンドで測定したBGレートおよび信号ゼロを仮定したtoy MC実験において得られる分岐比上限値の平均



$B = 3.3 \times 10^{-12}$ (median) $B = 2.2 \times 10^{-12}$ (median) $B = 1.6 \times 10^{-12}$ (median)

これまでの分岐比上限値を一桁近く上回る実験感度を達成!

サイドバンド解析

- サイドバンド解析
 - サイドバンドで信号解析領域と同じlikelihood解析を行う。
 - $T_{e\gamma}$ -sideband (off-time)
 - Angle-sideband (off-angle)
- いずれのサイドバンド解析でも実験感度と矛盾のない分岐比上限値が得られた。

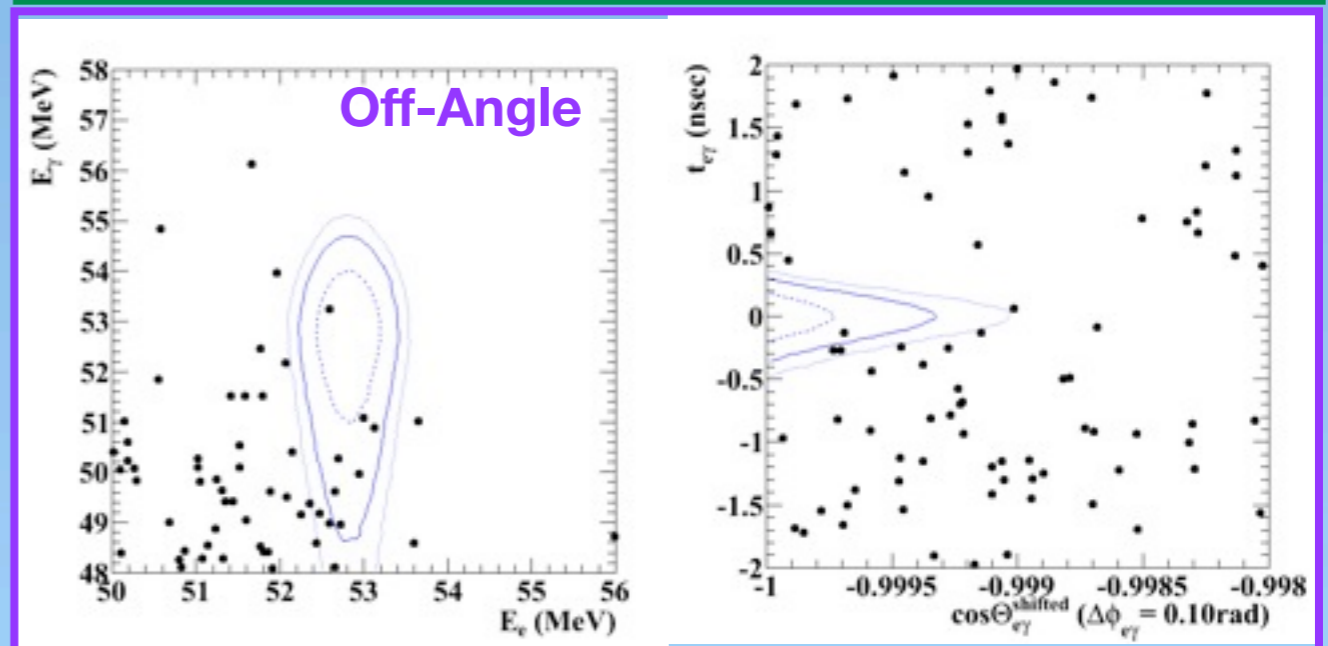
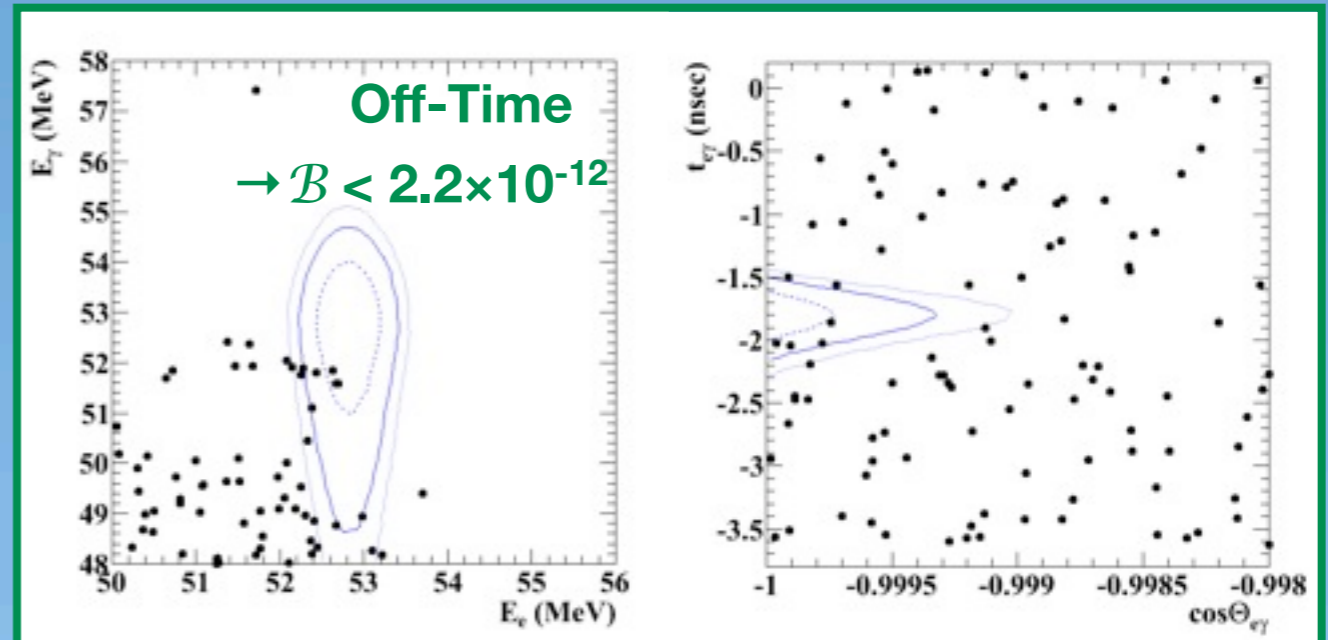
Selection

$(E_e - E_\gamma): \Theta_{e\gamma} < 178.4^\circ \quad |T_{e\gamma}| < 0.278\text{ns}$

$(\cos\Theta_{e\gamma} - t_{e\gamma}): 51 < E_\gamma < 55\text{MeV} \quad 52.34 < E_e < 55\text{MeV}$

Blue curves:

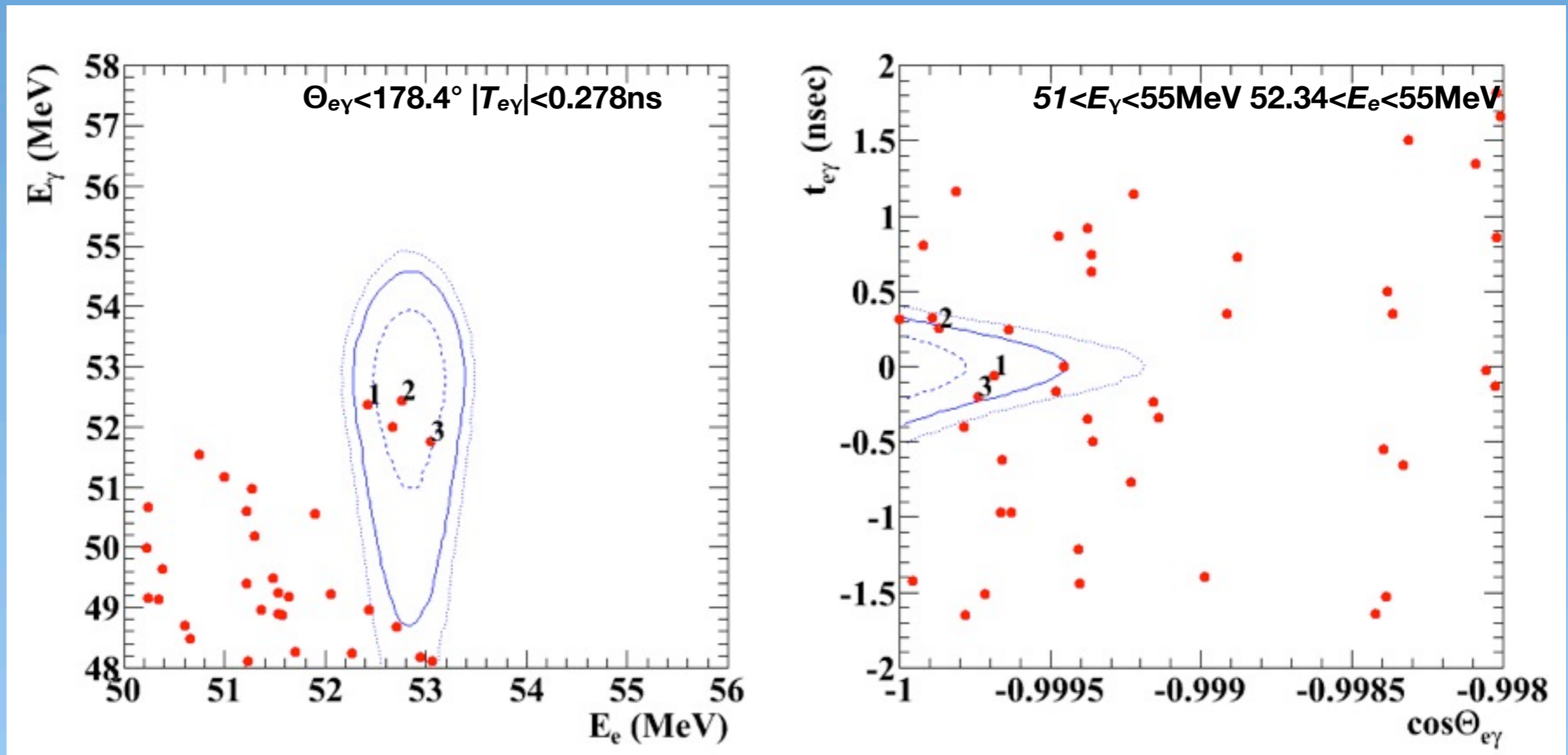
PDF contour (1, 1.64, 2- σ)



注：事象分布プロット自体は解析には使われていない

Run2009 事象分布

- 事象分布は昨夏の暫定結果と比べほぼ変化無し



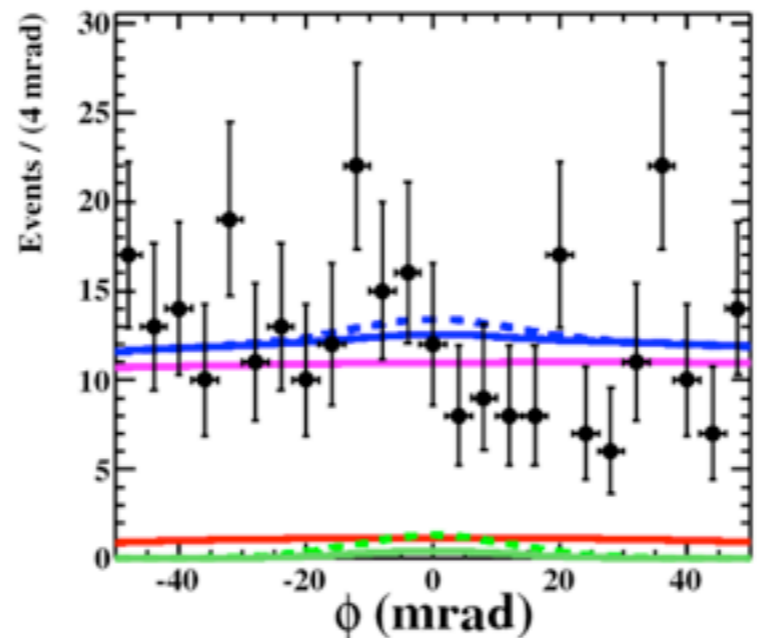
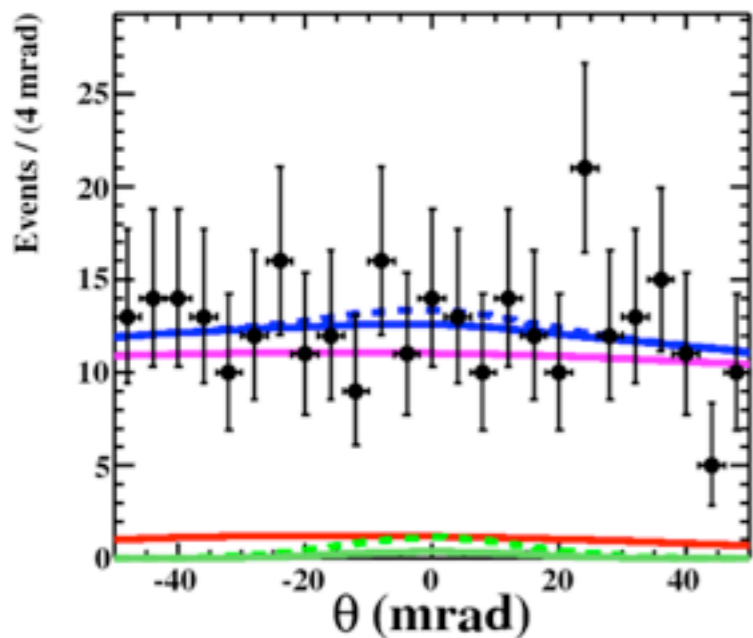
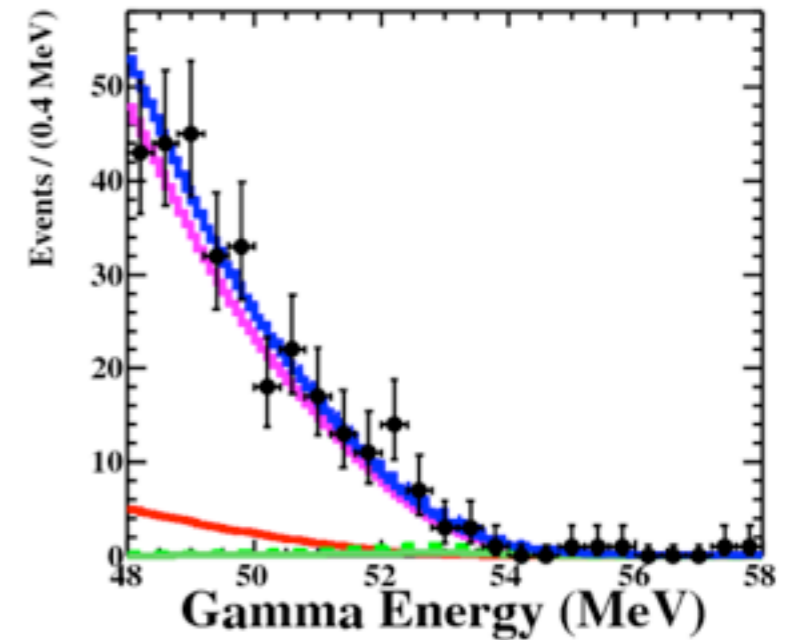
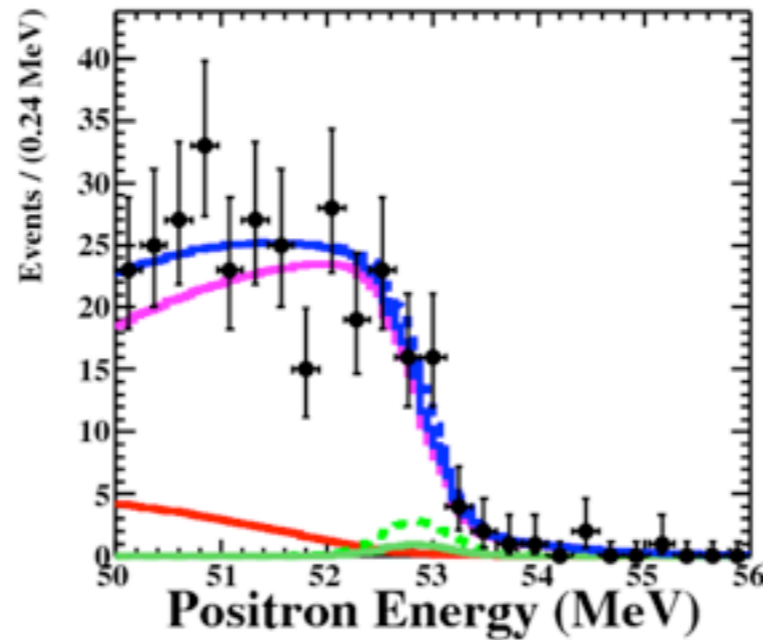
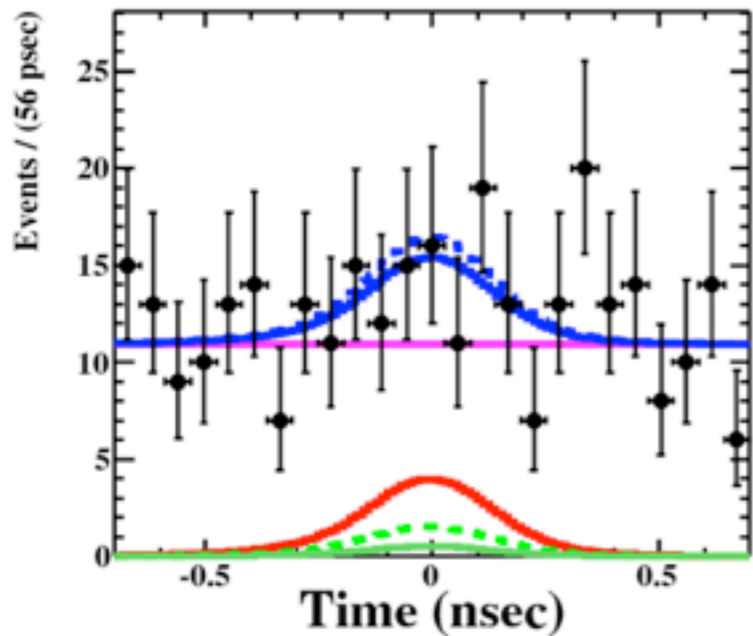
Blue curves: signal PDF contour (1, 1.64, 2- σ)

Events with highest signal likelihood ($S/(0.1R+0.9B)$) are numbered.

注：事象分布プロット自身は解析には使われていない

Run2009 Likelihood Fit

フィット領域: $48 < E_\gamma < 58 \text{ MeV}$, $50 < E_e < 56 \text{ MeV}$, $|T_{e\gamma}| < 0.7 \text{ ns}$, $|\theta_{e\gamma}| < 50 \text{ mrad}$, $|\Phi_{e\gamma}| < 50 \text{ mrad}$



- BG (best fit)
- RMD (best fit)
- Signal (best fit)
- Total
- - - Signal (UL 90%C.L.)
- - - Total w/ signal UL

Best fit

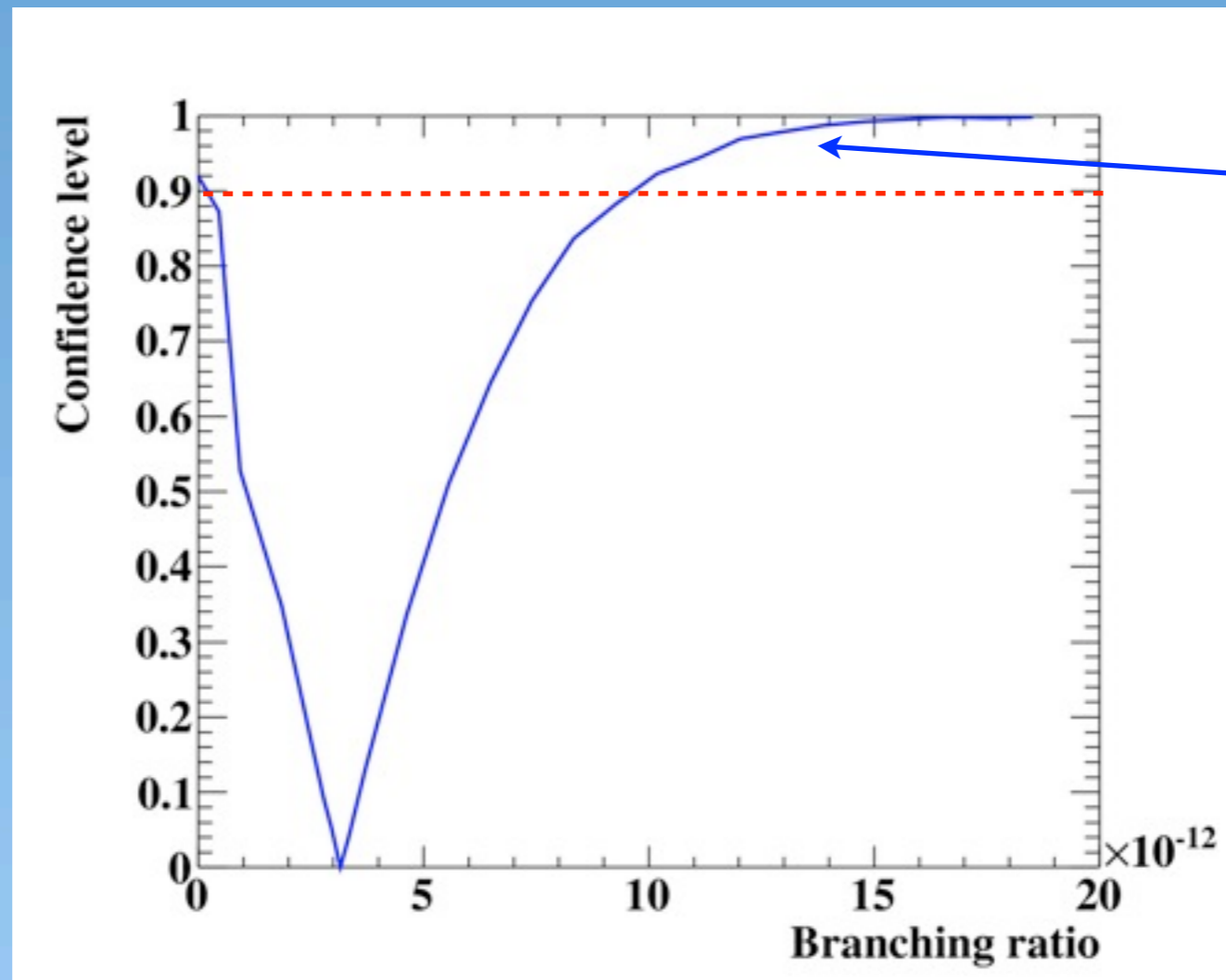
$$N_{\text{signal}} = 3.4$$

$$\mathcal{B} = 3.2 \times 10^{-12}$$

ICHEP2010での暫定結果($N_{\text{sig}}=3.0$) とほぼ同じ

Run 2009 Confidence Interval

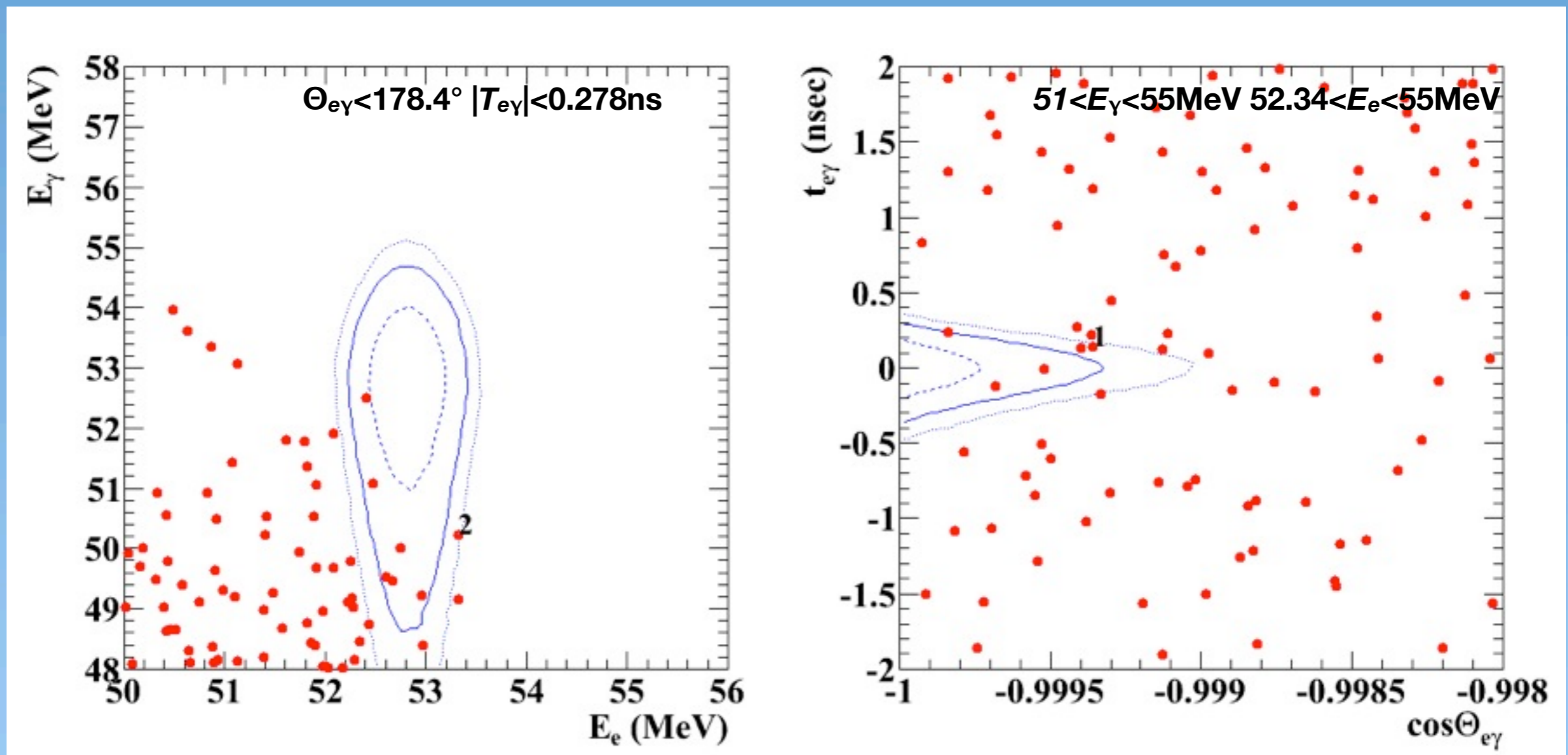
$$1.7 \times 10^{-13} < \mathcal{B} < 9.6 \times 10^{-12} \text{ (90\% C.L., incl. sys.)}$$



CL curve:
任意のconfidence
levelでのallowed
regionを読み取れる

$\mathcal{B} = 0$ is marginally excluded, but significance is not high. (p-value is only 8%)

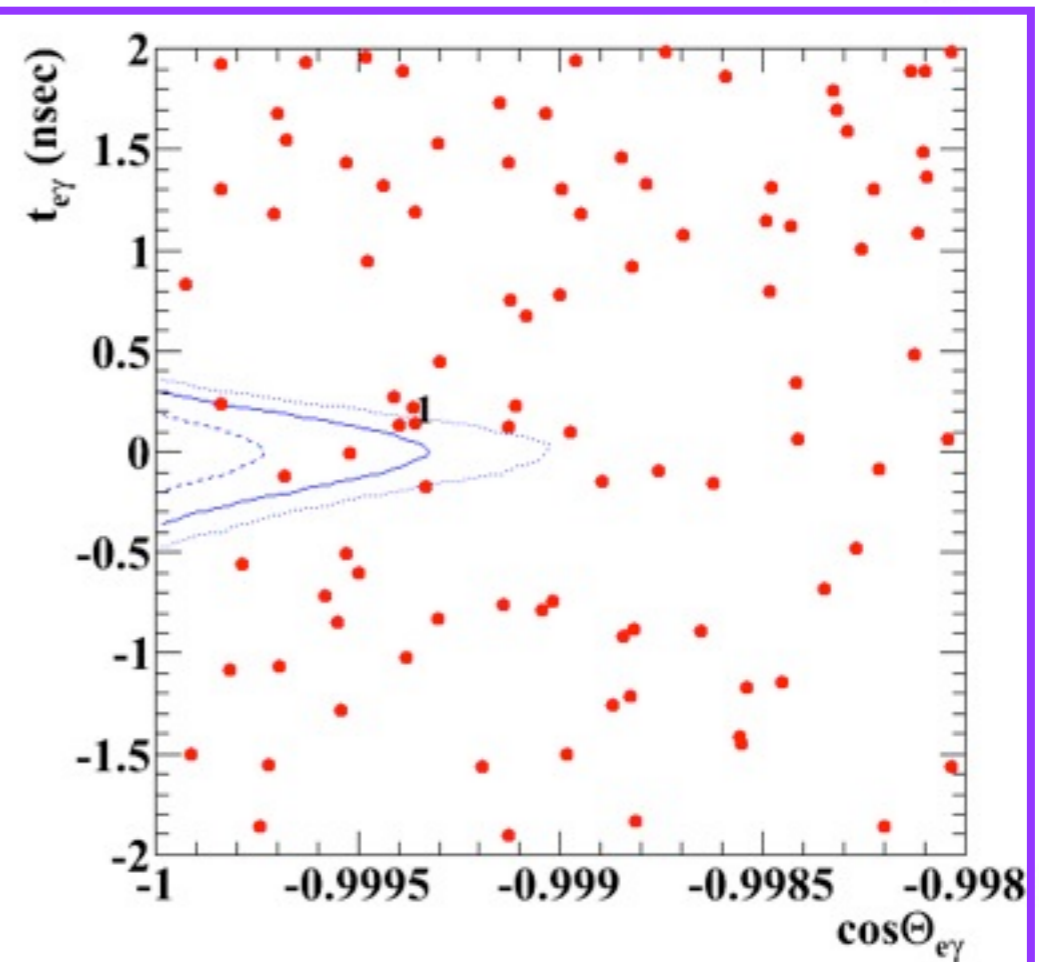
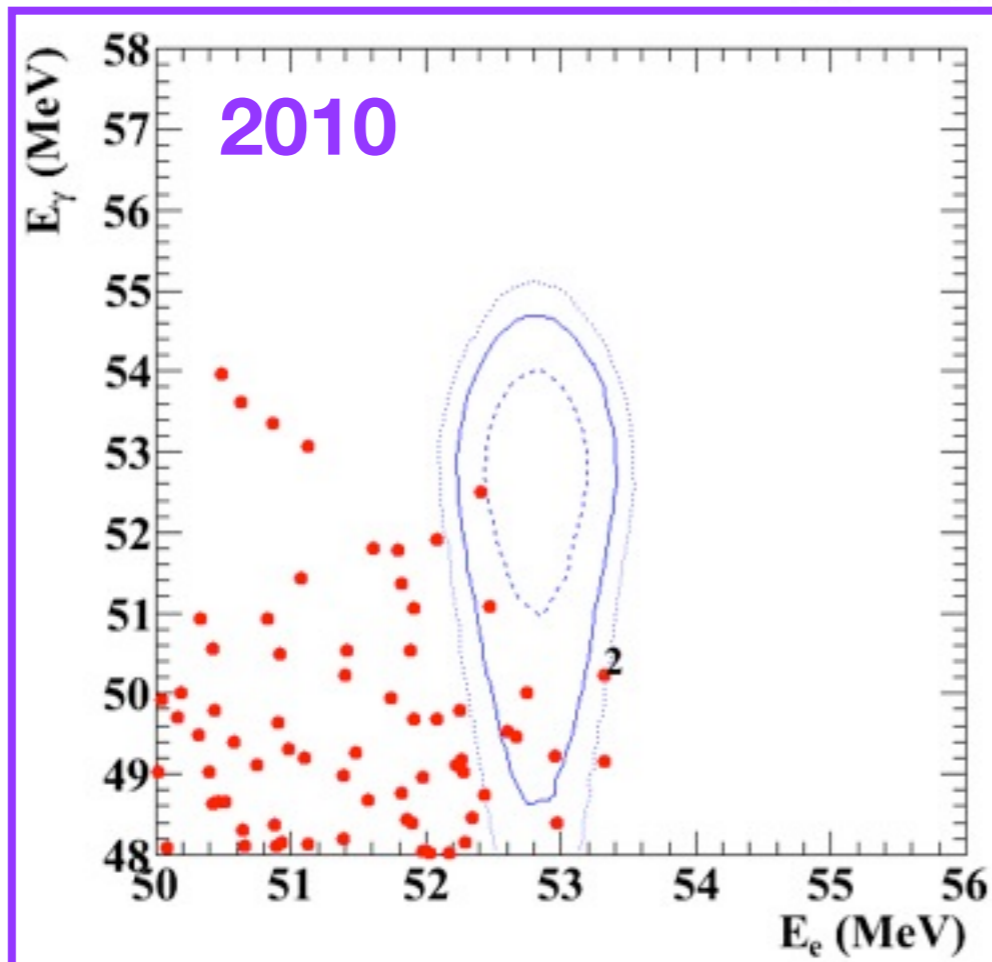
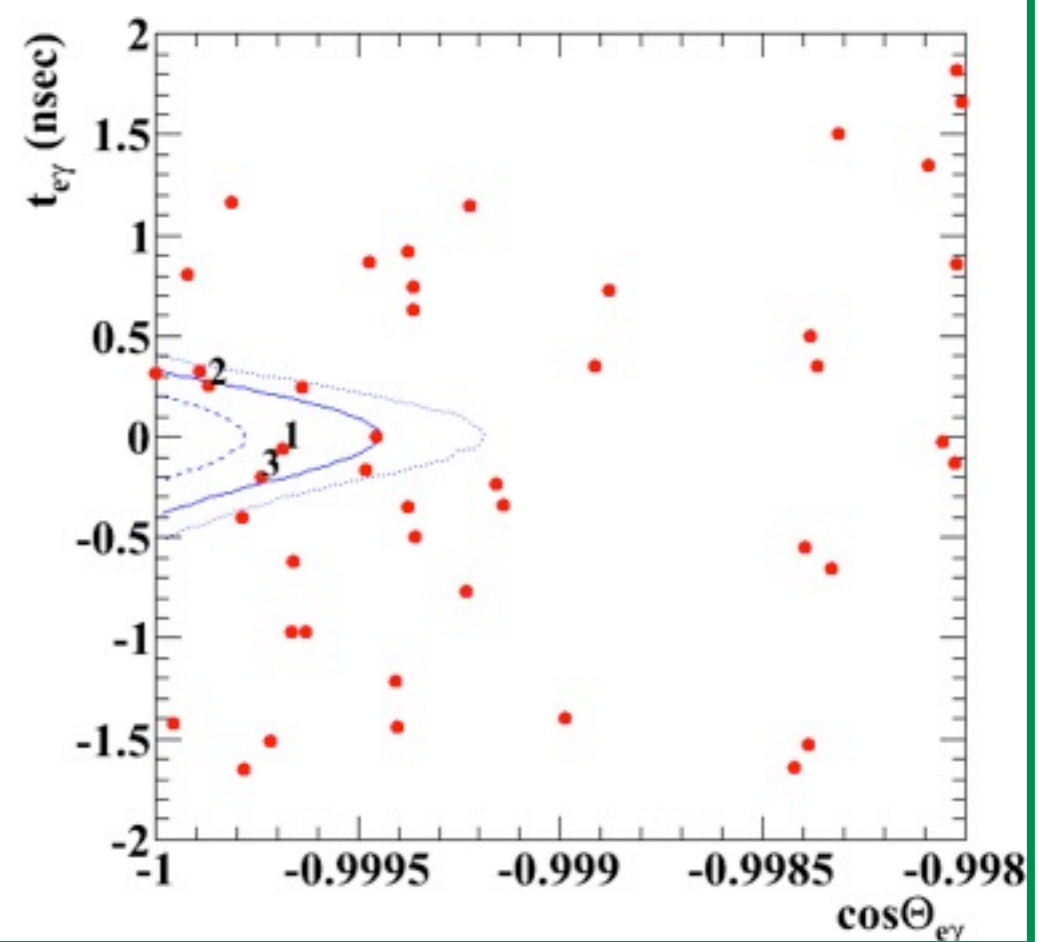
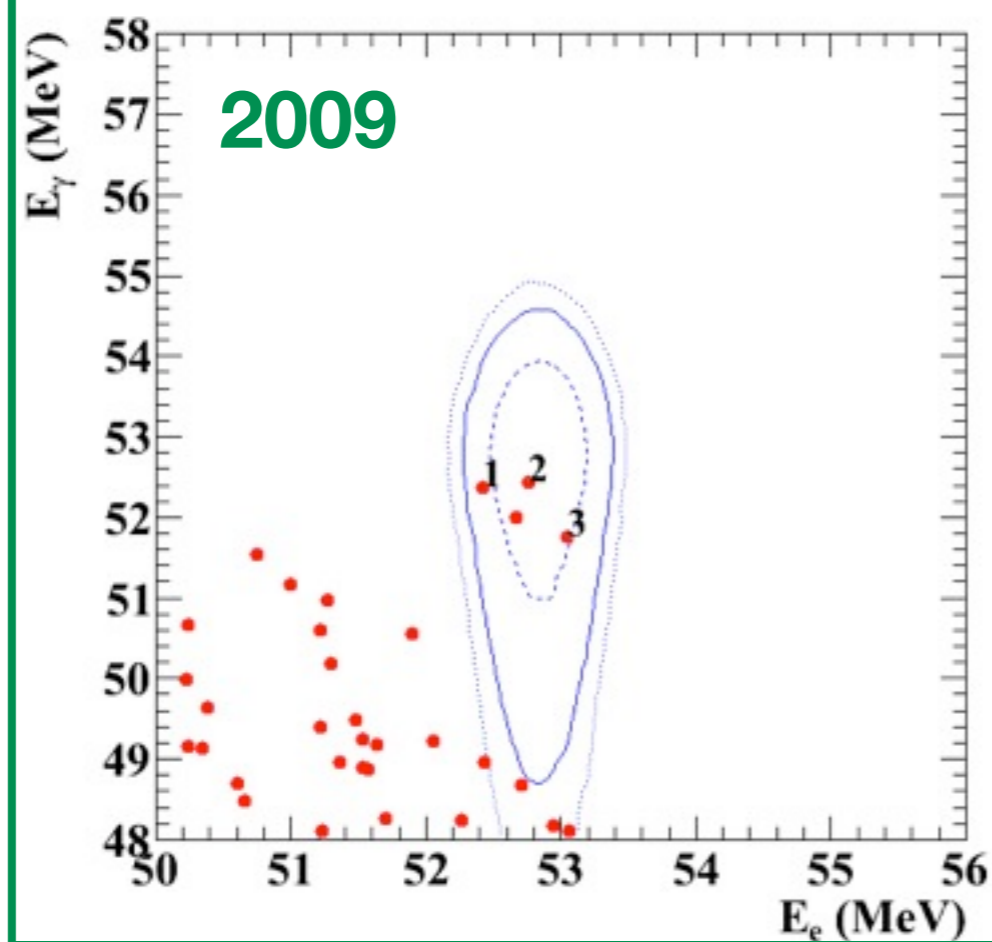
Run2010 事象分布



Blue curves: signal PDF contour (1, 1.64, 2- σ)

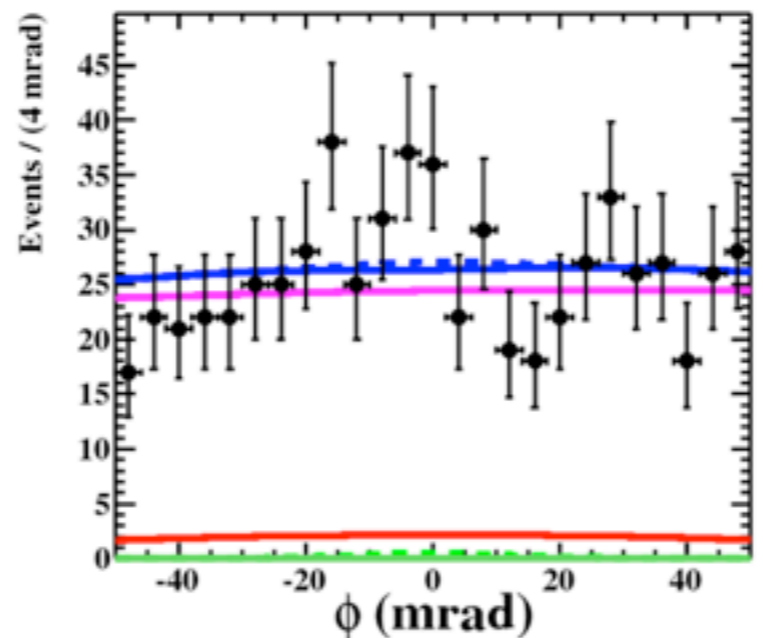
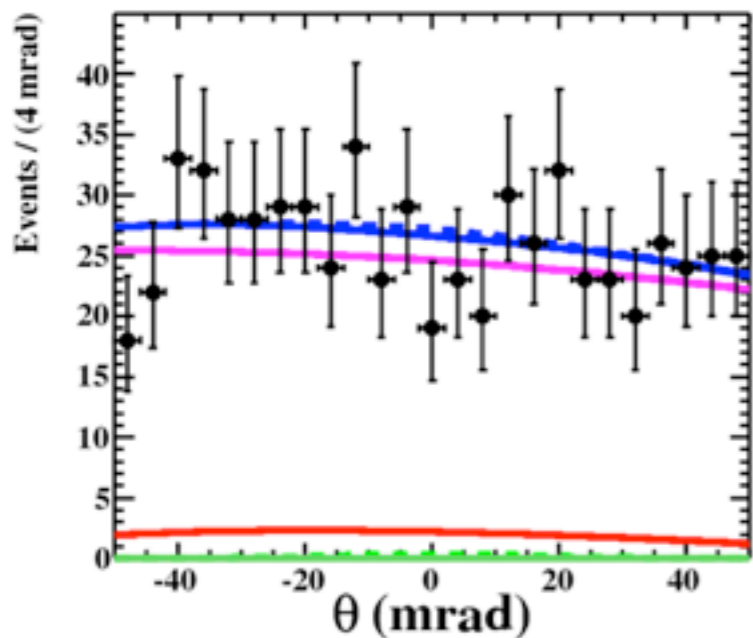
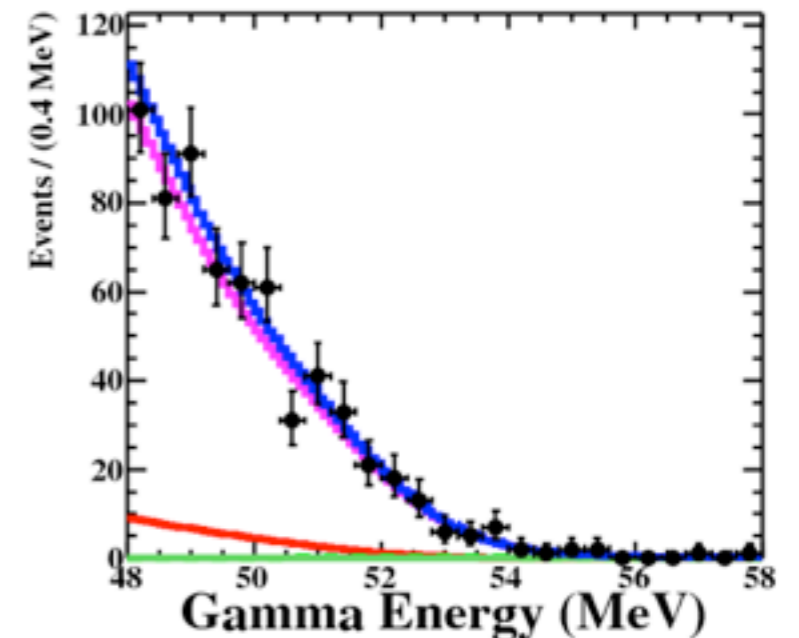
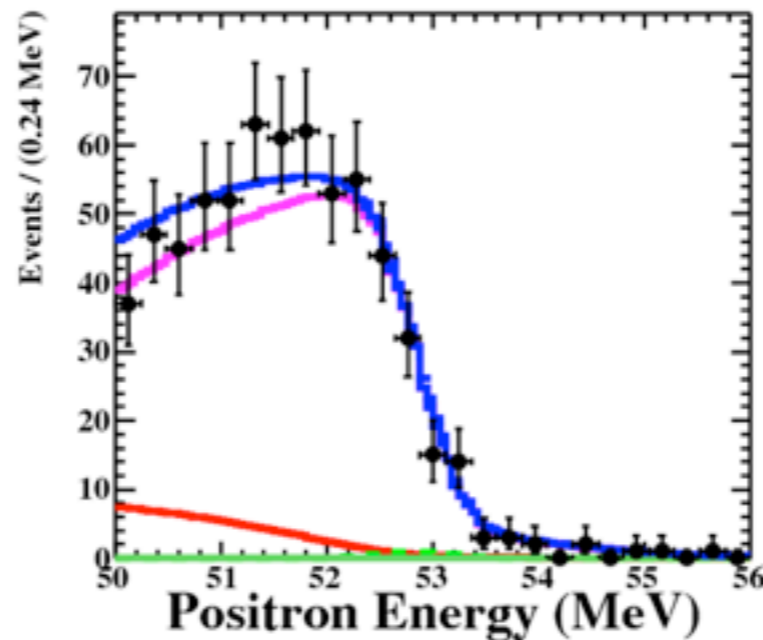
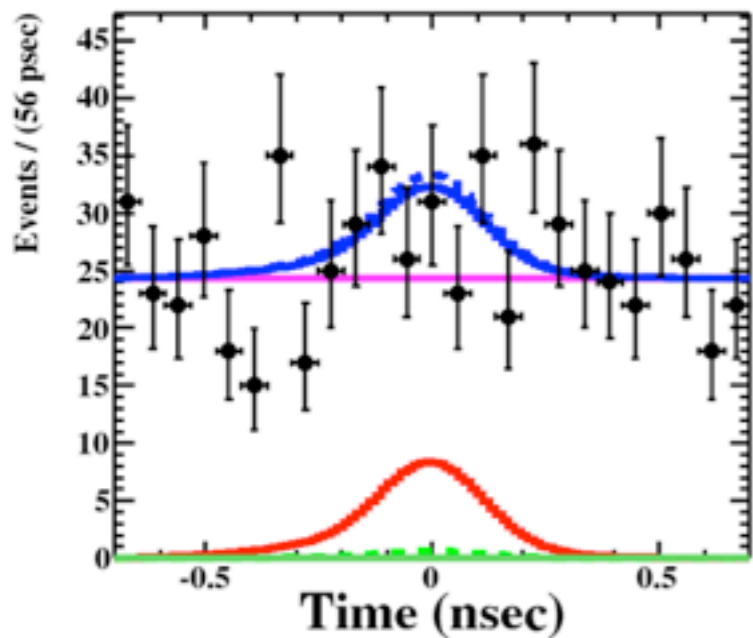
Events with highest signal likelihood ($S/(0.1R+0.9B)$) are numbered.

注：事象分布プロット自身は解析には使われていない



Run2010 Likelihood Fit

フィット領域: $48 < E_\gamma < 58 \text{ MeV}$, $50 < E_e < 56 \text{ MeV}$, $|T_{e\gamma}| < 0.7 \text{ ns}$, $|\theta_{e\gamma}| < 50 \text{ mrad}$, $|\Phi_{e\gamma}| < 50 \text{ mrad}$



- BG (best fit)
- RMD (best fit)
- - - Signal (best fit)
- Total
- - - Signal (UL 90% C.L.)
- - - Total w/ signal UL

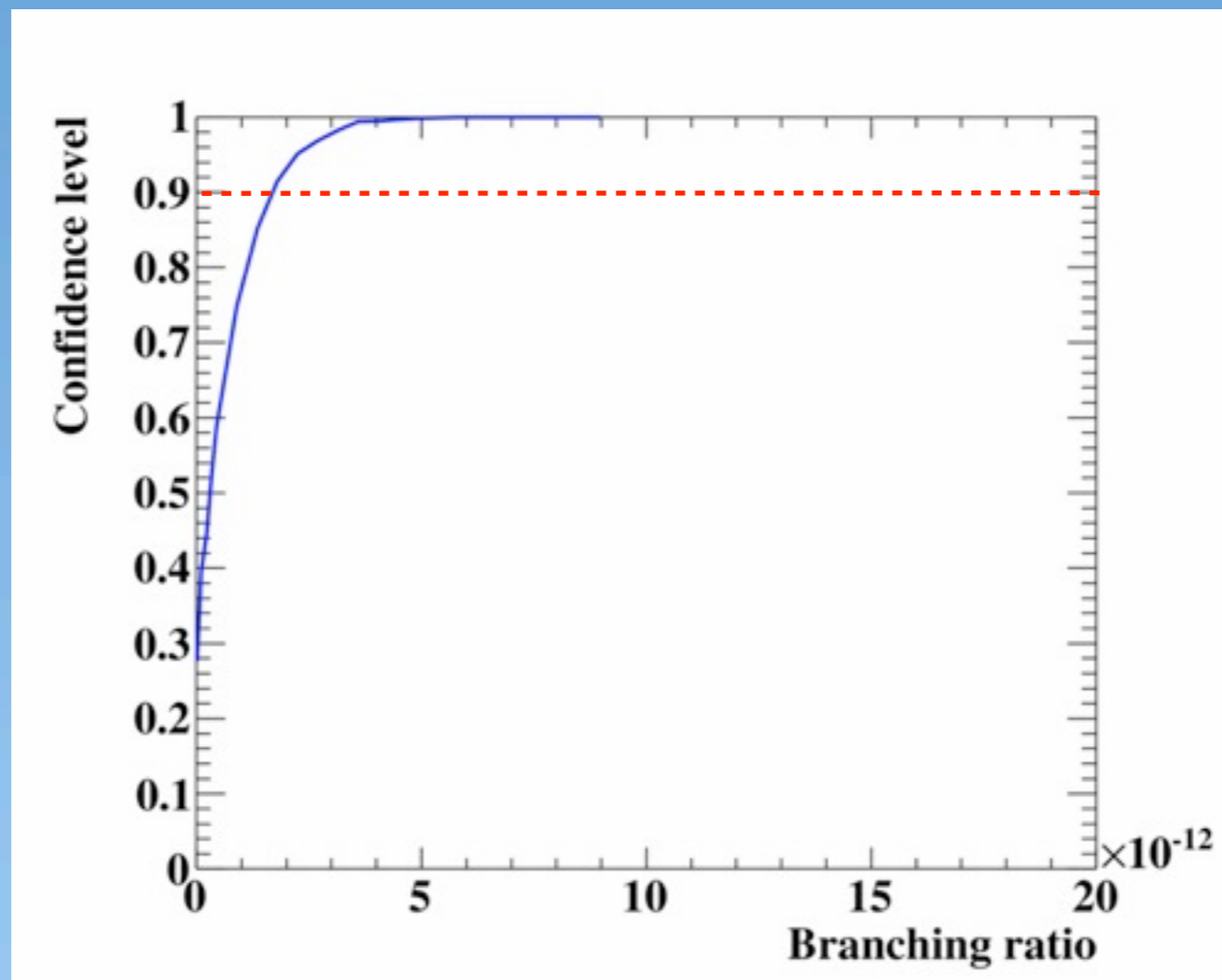
Best fit

$$N_{\text{signal}} = -2.2$$

$$\mathcal{B} = -9.9 \times 10^{-13}$$

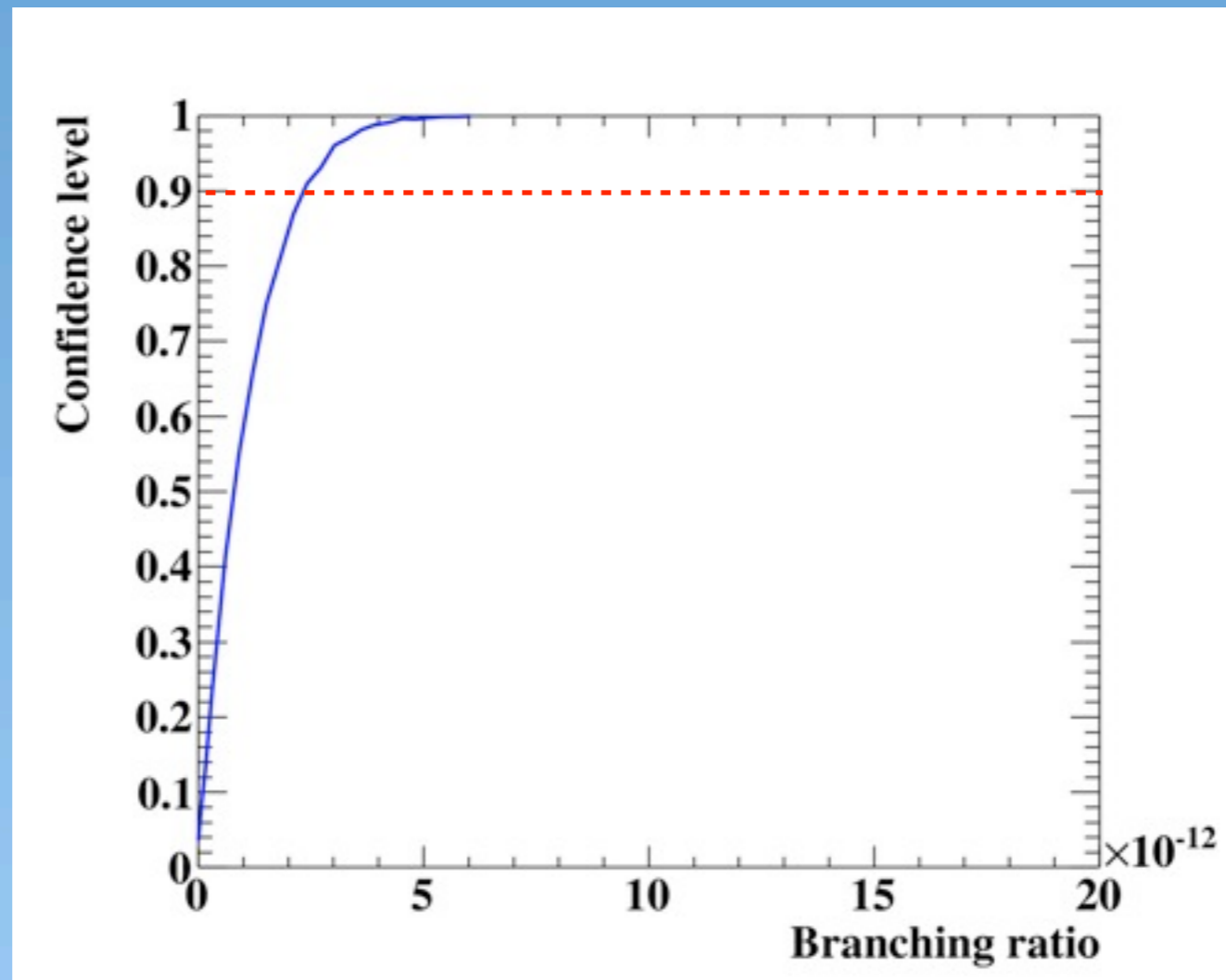
Run2010 Confidence Interval

$B < 1.7 \times 10^{-12}$ (90% C.L., incl. sys.)



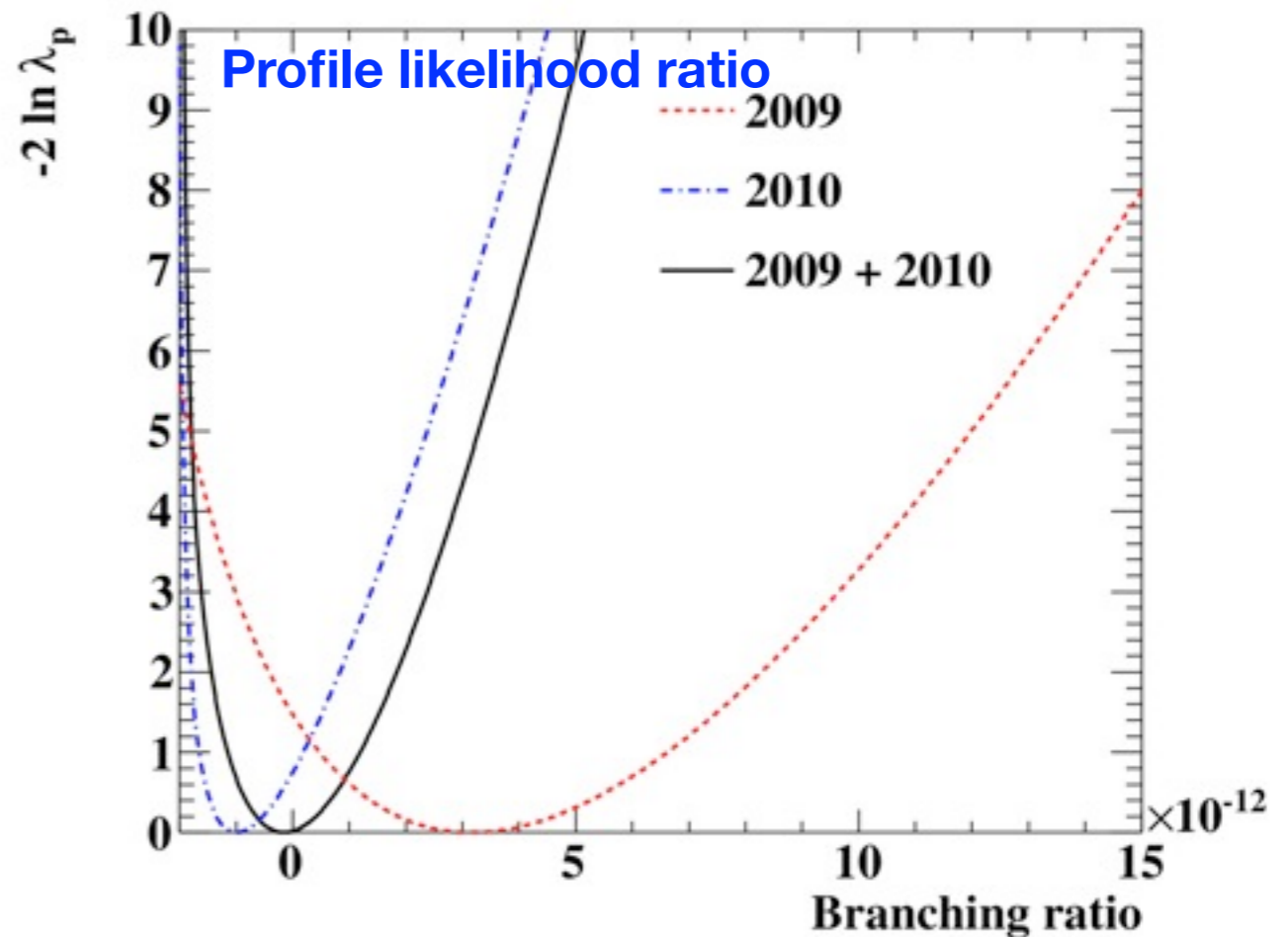
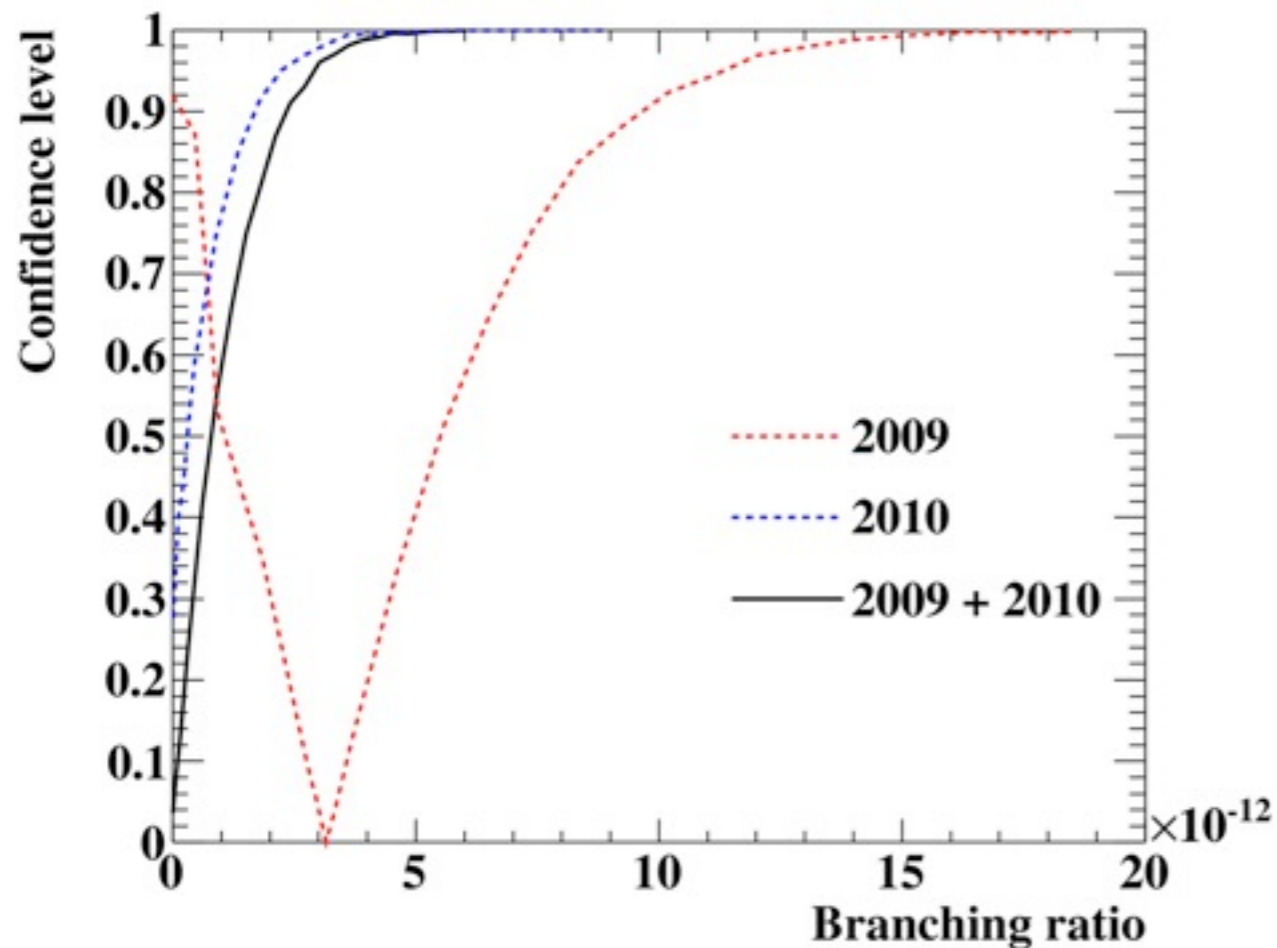
2009+2010 Combined

$B < 2.4 \times 10^{-12}$ (90% C.L., incl. sys.)



Combined data set is analyzed as a single data set
(Note that PDF is on an even-by-event basis.)

2009+2010 Combined



N.B. likelihood curves are not directly used in confidence interval calculation

Compatibility bw/ 2009 and 2010 ~15%

系統誤差

主要な系統誤差

Center of $\theta_{e\gamma}$ and $\phi_{e\gamma}$	0.18
Positron correlations	0.16
Normalization	0.13
E_γ scale	0.07
E_e bias, core and tail	0.06
$t_{e\gamma}$ center	0.06
E_γ BG shape	0.04
E_γ signal shape	0.03
Positron angle resolutions ($\theta_e, \phi_e, z_e, y_e$)	0.02
γ angle resolution ($u_\gamma, v_\gamma, w_\gamma$)	0.02
E_e BG shape	0.02
E_e signal shape	0.01

RMS of $\Delta(\Delta\text{NLL})$
(not used in final
calculation)

- ◎ Confidence interval計算における系統誤差の取り入れ方 (frequentist-Bayesian hybrid)
- ◎ Uncertainties of PDF parameters: **fluctuating param. in toy MC generation**
- ◎ Uncertainties of $N_{\text{RMD}}, N_{\text{BG}}$: **profiling**
- ◎ 統計誤差に比べて系統誤差の影響は小さい
 - ◎ B upper limitへの影響~2%程度

最新物理結果まとめ

Data set	\mathcal{B}_{fit}	Sensitivity	LL	UL
2009	3.2×10^{-12}	3.3×10^{-12}	1.7×10^{-13}	9.6×10^{-12}
2010	-9.9×10^{-12}	2.2×10^{-12}	-	1.7×10^{-12}
2009+2010	-1.5×10^{-12}	1.6×10^{-12}	-	2.4×10^{-12}

Run2009+2010解析結果 $\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 2.4 \times 10^{-12}$ (90% C.L.)

これまでの分岐比上限値の記録 (1.2×10^{-11}) を5倍更新!

MEG実験の現状

◎ Run2011

- ◎ 2011年6月末から物理ラン開始。順調にデータを取得中
 - ◎ Multi buffer schemeの導入によるDAQ効率の改善
 - ◎ HVモジュールの交換によりdrift chamberのノイズが改善
 - ◎ TCファイバカウンタ動作
- ◎ データ統計量はrun2010のおよそ二倍を期待

◎ Run2012

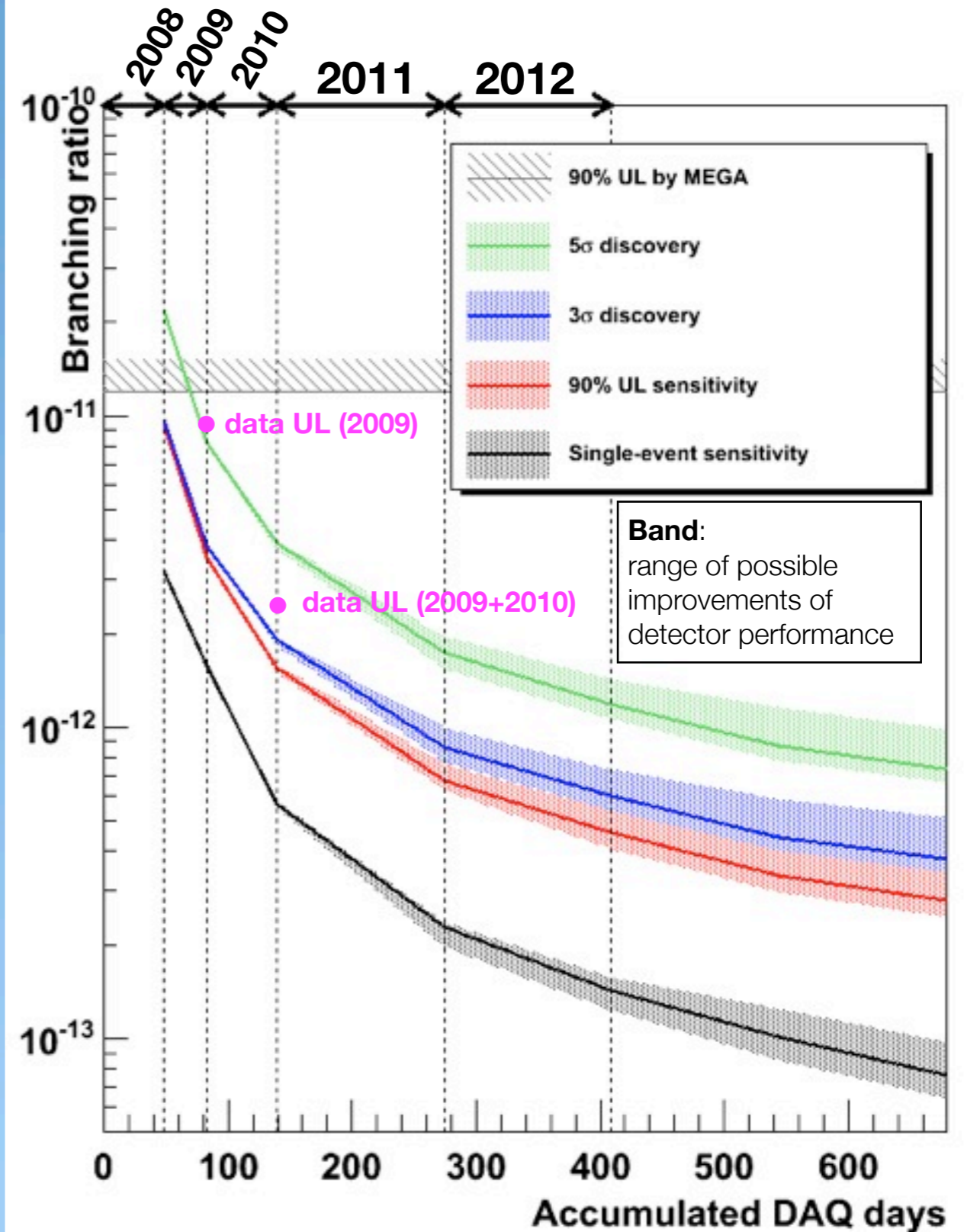
- ◎ データ統計量はrun2011と同等+ α を期待

MEG実験の今後

- ◎ 大事なのは
 - ◎ **とにかくデータを貯める**(まだBGでリミットされていない)
 - ◎ **分解能改善の地道な努力**
- ◎ 改善が期待される点
 - ◎ Efficiency improvement with thinner DC cables / optimum cable layout
 - ◎ Better positron reconstruction with
 - ◎ Reduced noise (adaptive filter/new DC HV)
 - ◎ Z-measuring fiber counters
 - ◎ Calibration with monochromatic positron beam (Mott scattering)
 - ◎ Positron timing
 - ◎ E_γ resolution with precise calibration and better reconstruction algorithms
 - ◎ Beam intensity optimization
 - ◎ ...
- ◎ **大幅な改善は検出器のアップグレードが必要**

実験感度の見通し

- ◎ 今年(2011)のデータでいよいよ 10^{-13} 台に突入
- ◎ まだBGで制限されていない
- ◎ 検出器性能が現状のままでも2012年までのデータで $\sim 5 \times 10^{-13}$ までいける
- ◎ 10^{-13} 台の後半以上なら2, 3年で発見できる可能性が十分ある。
- ◎ その先は...?



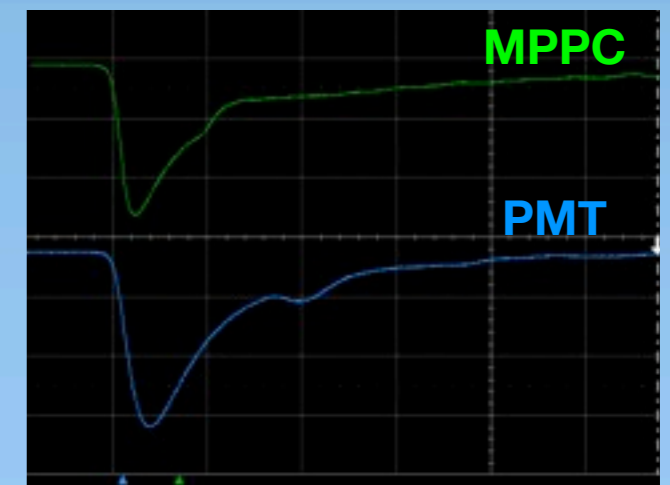
MEG実験アップグレード

- ◎ さらに一桁上の究極感度の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験を目指して
- ◎ いくつかのアイディアに基づきR&Dを始めている。
 - ◎ 科研費(特別推進)：H22-26
 - ◎ 検出器アップグレード
 - ◎ 液体キセノン検出器用高感度光センサー
 - ◎ 陽電子スペクトロメータの低物質量化、高計数率耐性向上
 - ◎ アクセプタンスの改善(逆側にも検出器を配置)
 - ◎ 偏極ミュオンビーム、準表面ミュオンビーム、active target
- ◎ コスト、スケジュールの評価

高量子効率PMT



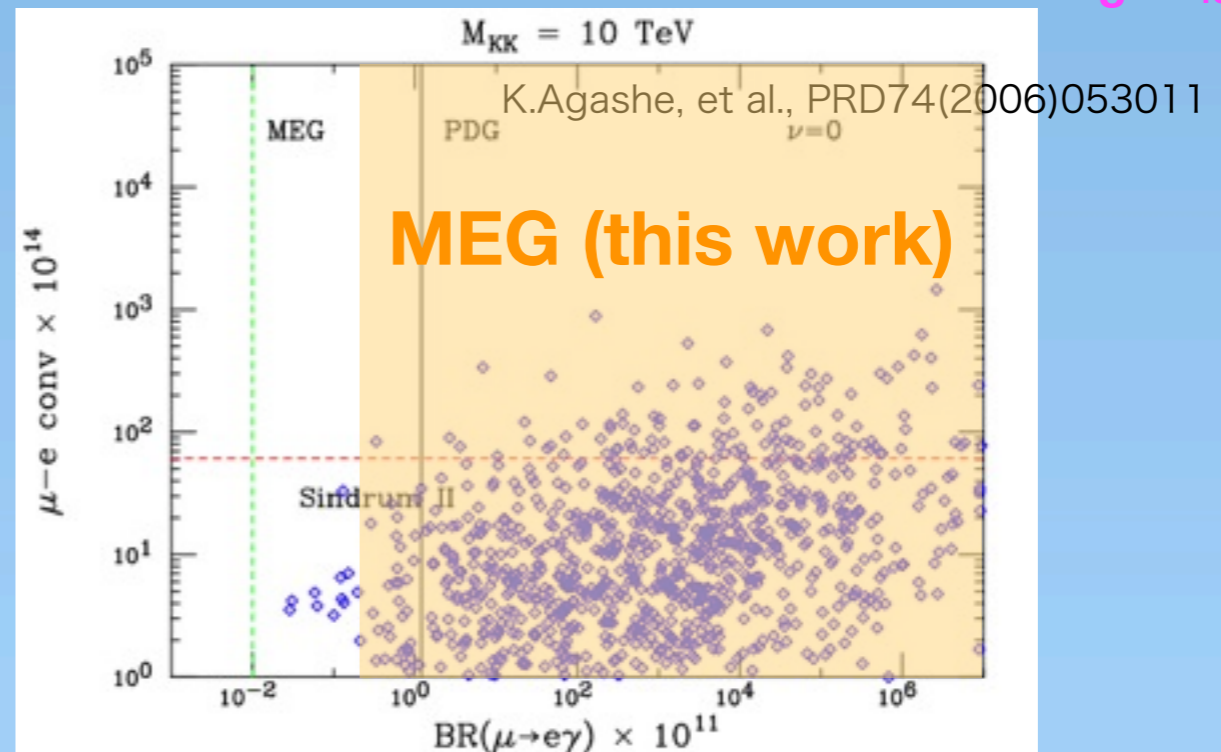
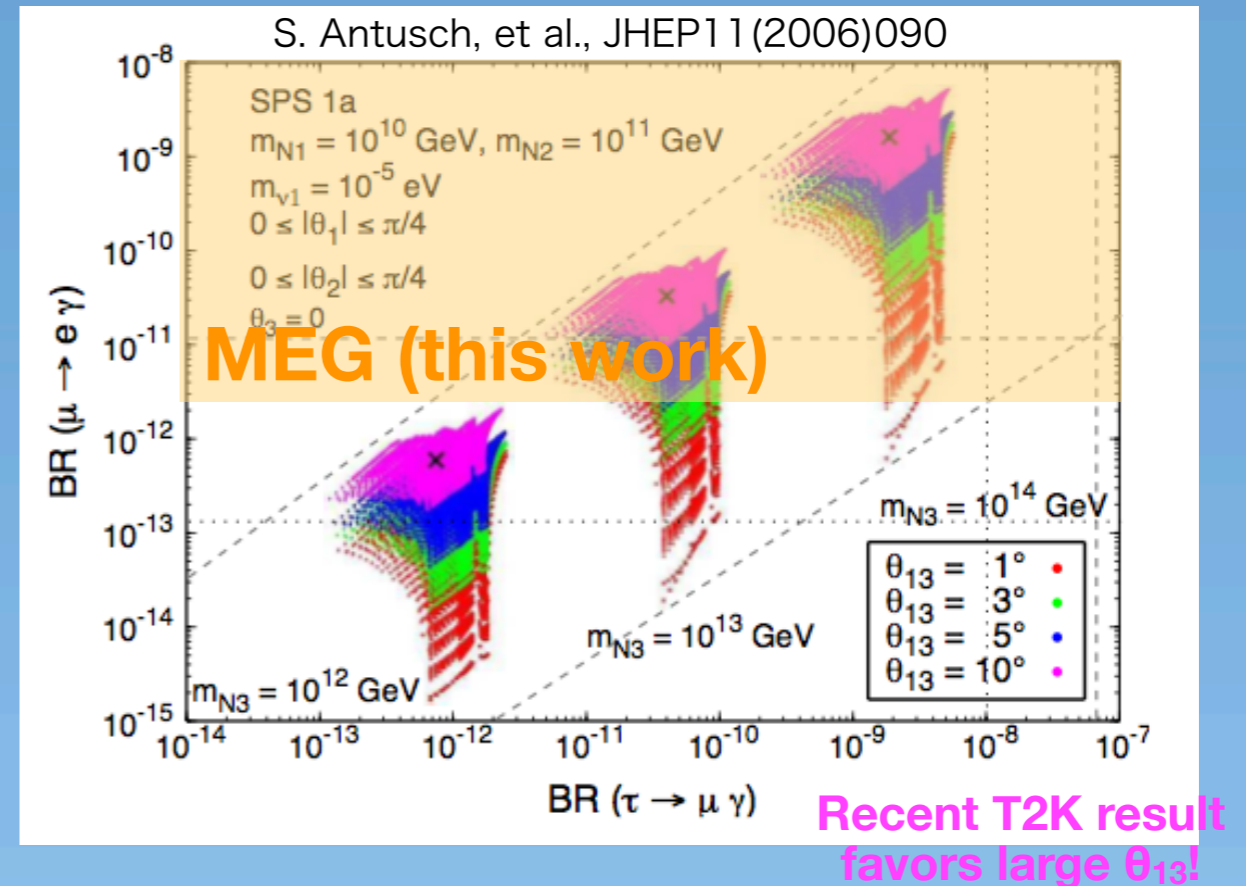
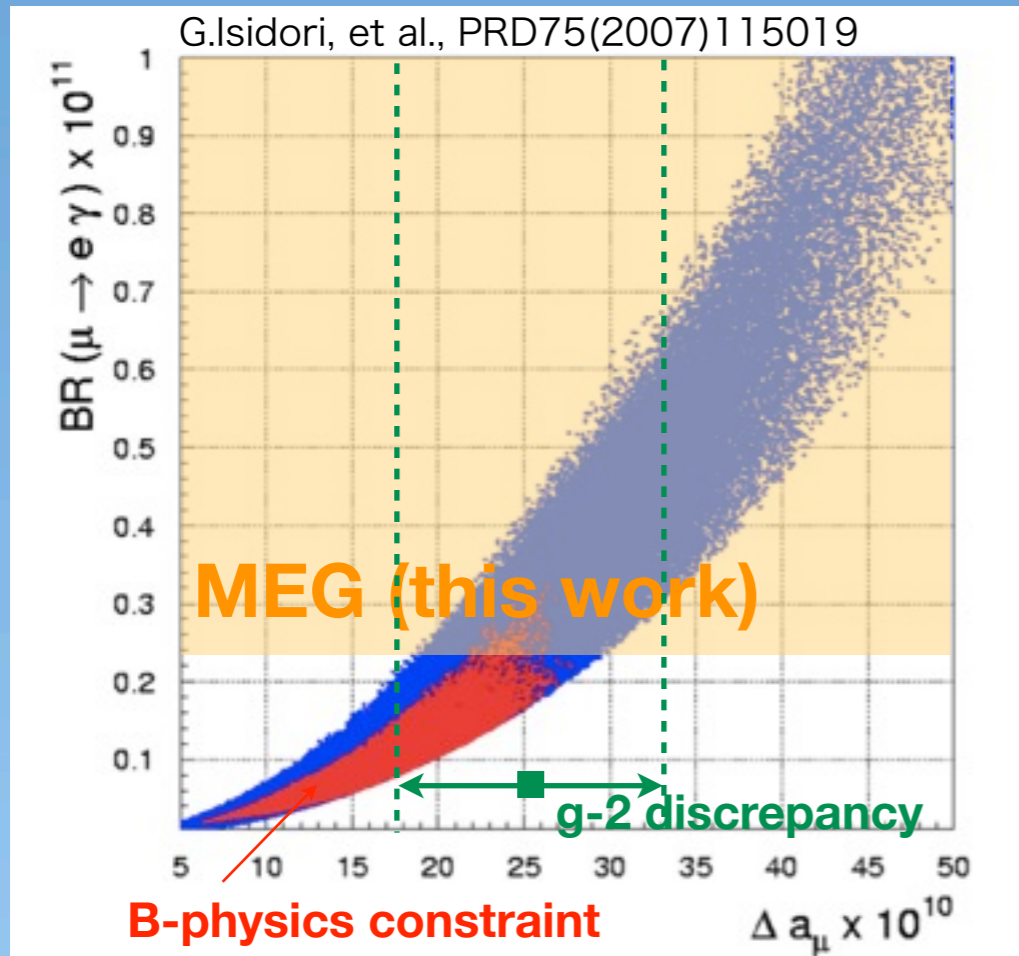
液体キセノン中で動作するMPPC(α 線)



まとめ

- ◎ Run2009, 2010データを用いた探索解析では信号の兆候なし。
- ◎ 分岐比上限値を5倍更新 ($\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 2.4 \times 10^{-12}$ (90% C.L.))。
 - ◎ arXiv:1107.5547, to appear in PRL
- ◎ Run2011でいよいよ前人未踏の 10^{-13} 台の探索へ。
 - ◎ とにかくより多くのデータを貯めることが重要。
 - ◎ 今の検出器性能のまま走っても2012までで $\sim 5 \times 10^{-13}$ はいける。
 - ◎ 発見の可能性も大いにあり。
- ◎ さらに一桁感度の高い実験を実現すべく検出器のアップグレード等に関するR&Dを進めている。

MEG is further constraining new physics!



Backup