

ダークセクター

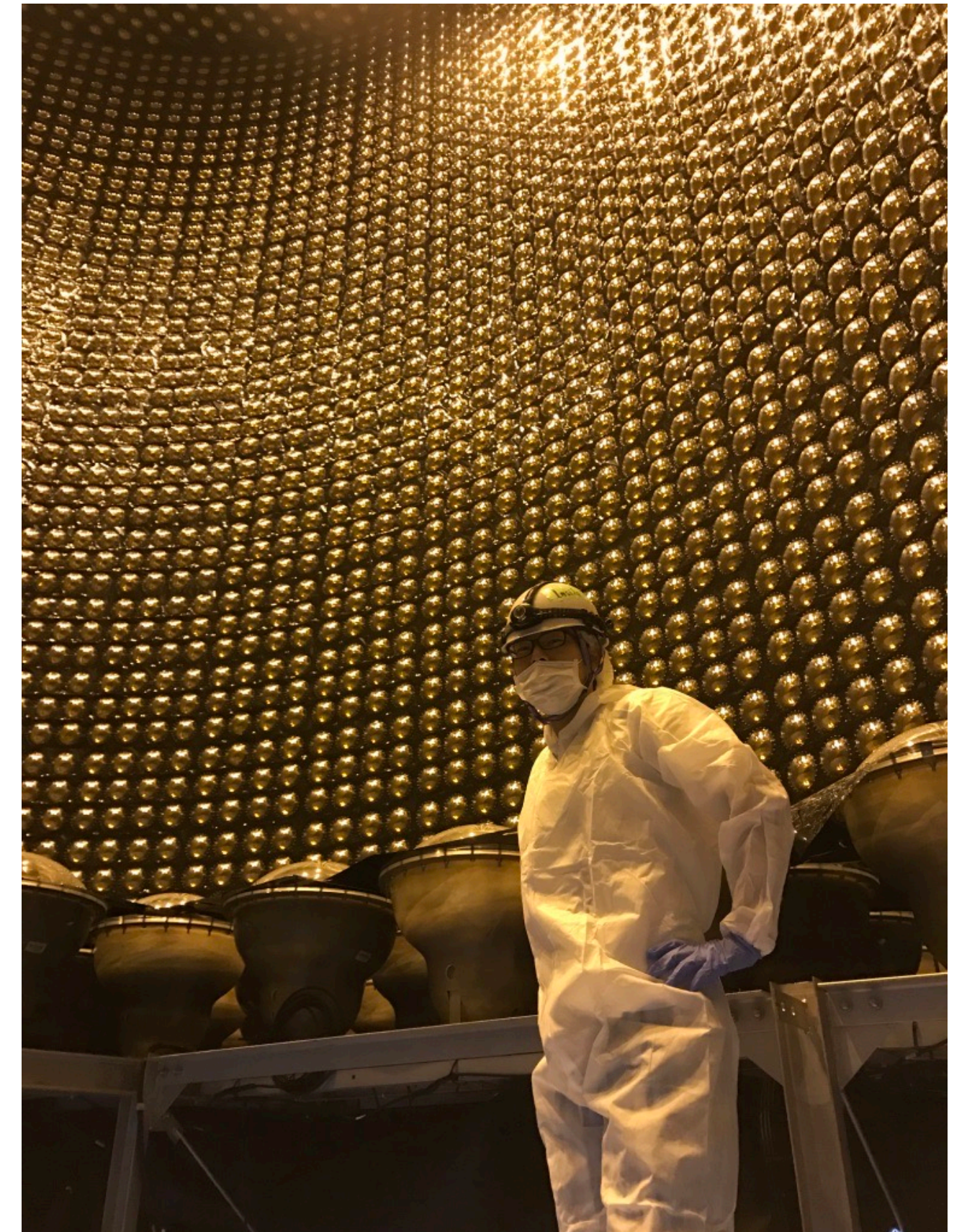
伊藤 慎太郎 (KEK)

2022年11月8日 Flavor Physics Workshop 2022



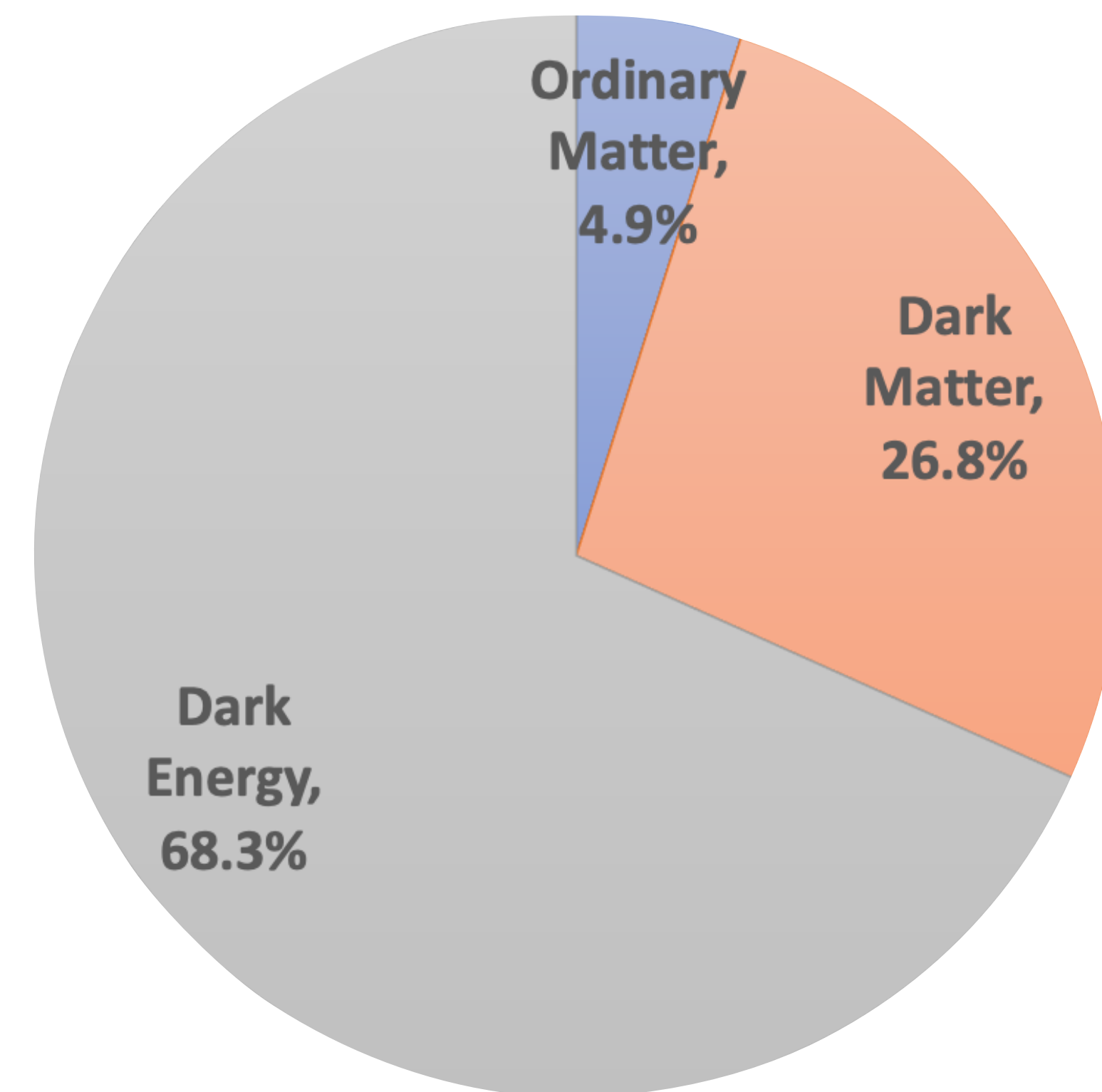
自己紹介と今日の内容

- 名前: 伊藤慎太郎 所属: KEK
- これまでの研究
 - 2011年~: PIENU実験 (TRIUMF)
 - ▶ 荷電パイ中間子の崩壊分岐比の精密測定によるレプトンユニバーサルティの解析
 - ▶ ダークセクター探索など
 - 2016年~2021年: Super-Kamiokande / SK-Gd実験
 - ▶ SK-Gdの推進
 - ▶ ニュートリノ解析など
 - 2021年4月よりBelle II: ダークセクター探索
- 今日の話
 - 前半はダークマターの基礎的な話(去年のトークも参照)
 - 後半はBelle IIでのダークセクター探索の紹介
 - ▶ B4の人にも実験の人にも理論の人にも学部生の人にも分かるように、優しめの内容にしています。



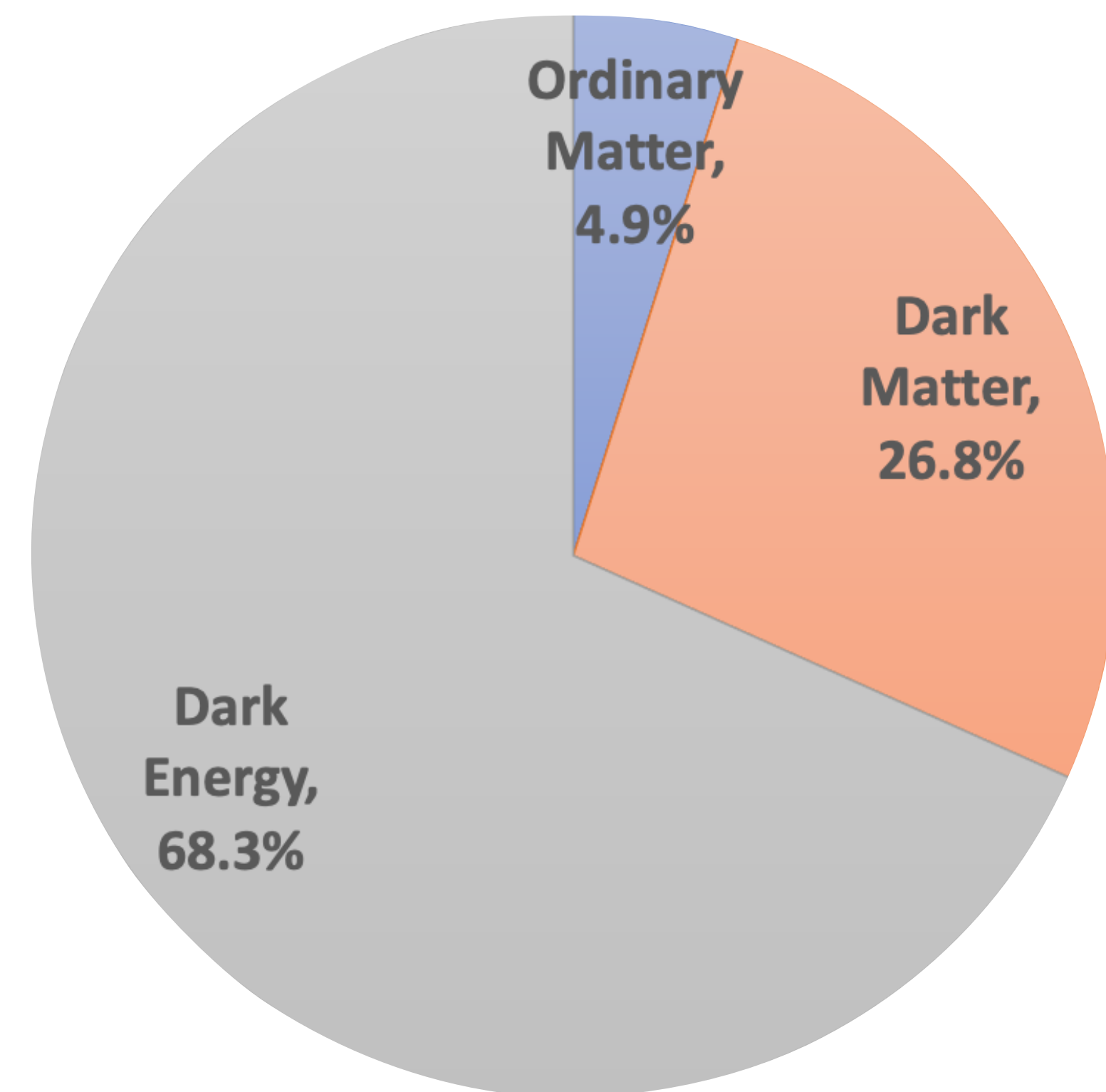
ダークマター(暗黒物質)とは?

- ダークマターの一般的な性質。
 - 光らない物質(光学的に観測できない)。
 - 宇宙の1/4を占める(我々が観測できているのはたかだか約5%)。
 - 質量をもつ(どのくらいなのかは分かっていない)。
 - 電荷をもたない。
 - 相互作用は非常に弱い。
 - 安定している(長寿命)。
 - 冷たい(飛び回っていない、モデルに依存)。



ダークマター(暗黒物質)とは?

- ダークマターの一般的な性質。
 - 光らない物質(光学的に観測できない)。
 - 宇宙の1/4を占める(我々が観測できているのはたかだか約5%)。
 - 質量をもつ(どのくらいなのかは分かっていない)。
 - 電荷をもたない。
 - 相互作用は非常に弱い。
 - 安定している(長寿命)。
 - 冷たい(飛び回っていない、モデルに依存)。
- ▶ **宇宙の観測ではダークマターが存在することは分かっているが、直接観測には至っていない。**



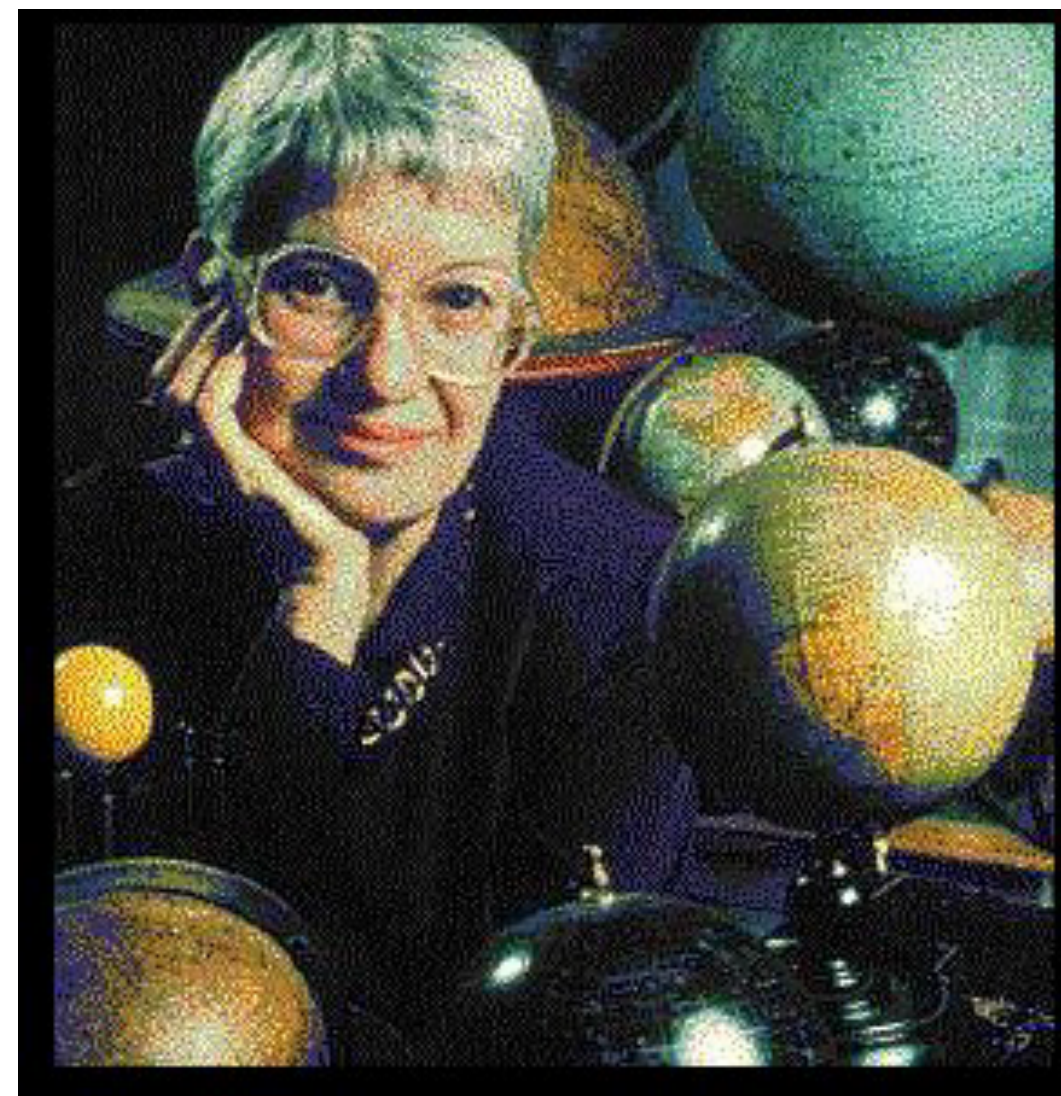
ダークマター存在の証拠1

- 初めてダークマターについて議論されたのは1933年 by F. Zwicky.
 - 「かみの毛座銀河団内の銀河が、見える銀河の重力だけでは説明できない速度で運動している」

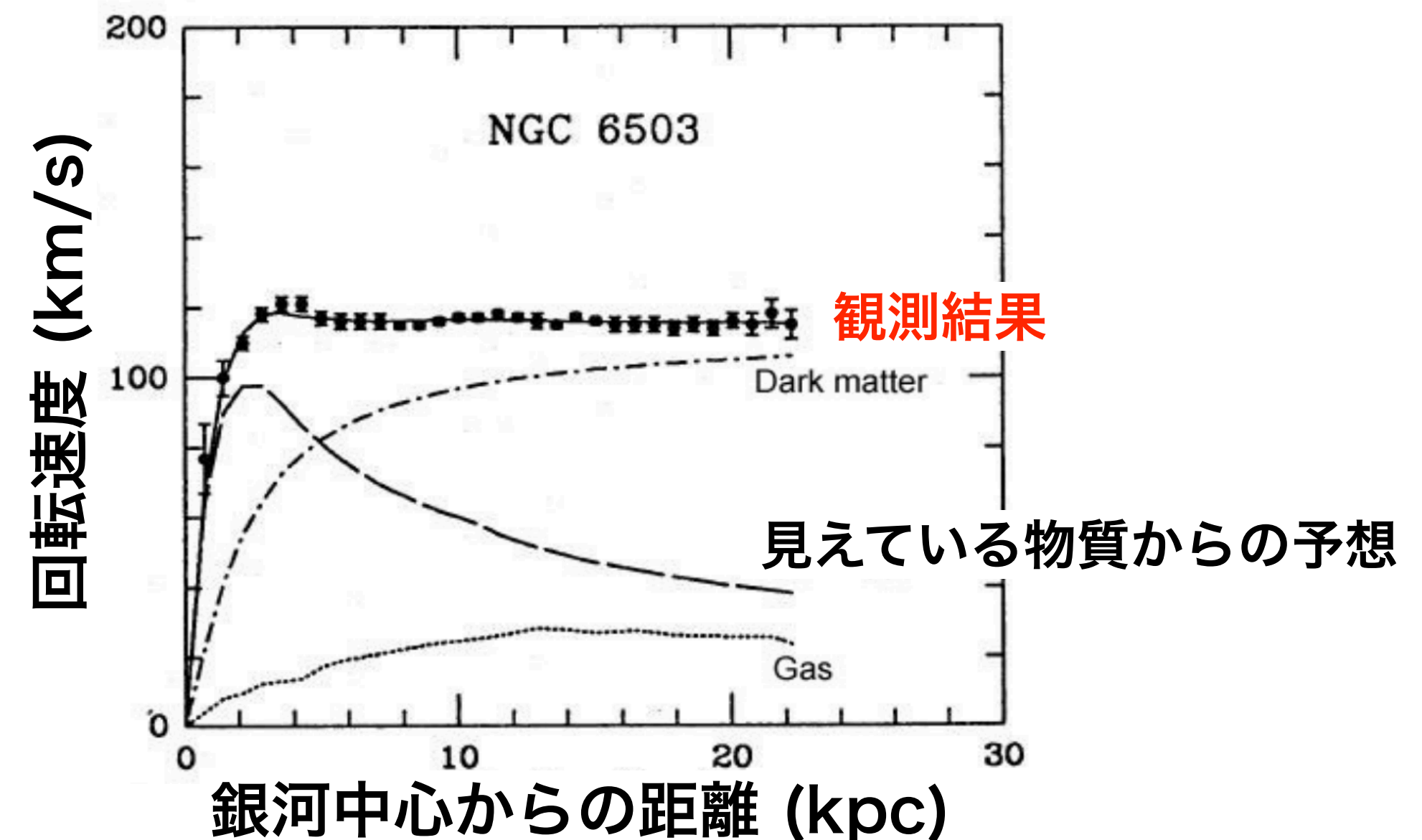


ダークマター存在の証拠1

- 初めてダークマターについて議論されたのは1933年 by F. Zwicky.
 - 「かみの毛座銀河団内の銀河が、見える銀河の重力だけでは説明できない速度で運動している」
- 1970年代にV. Rubinらにより本格的に観測。
 - ▶ 高速で回転するには強い引力が必要。
 - **目に見える星の質量だけでは足りない!!!**
 - **「目に見えない」何かがあるはず!!!**

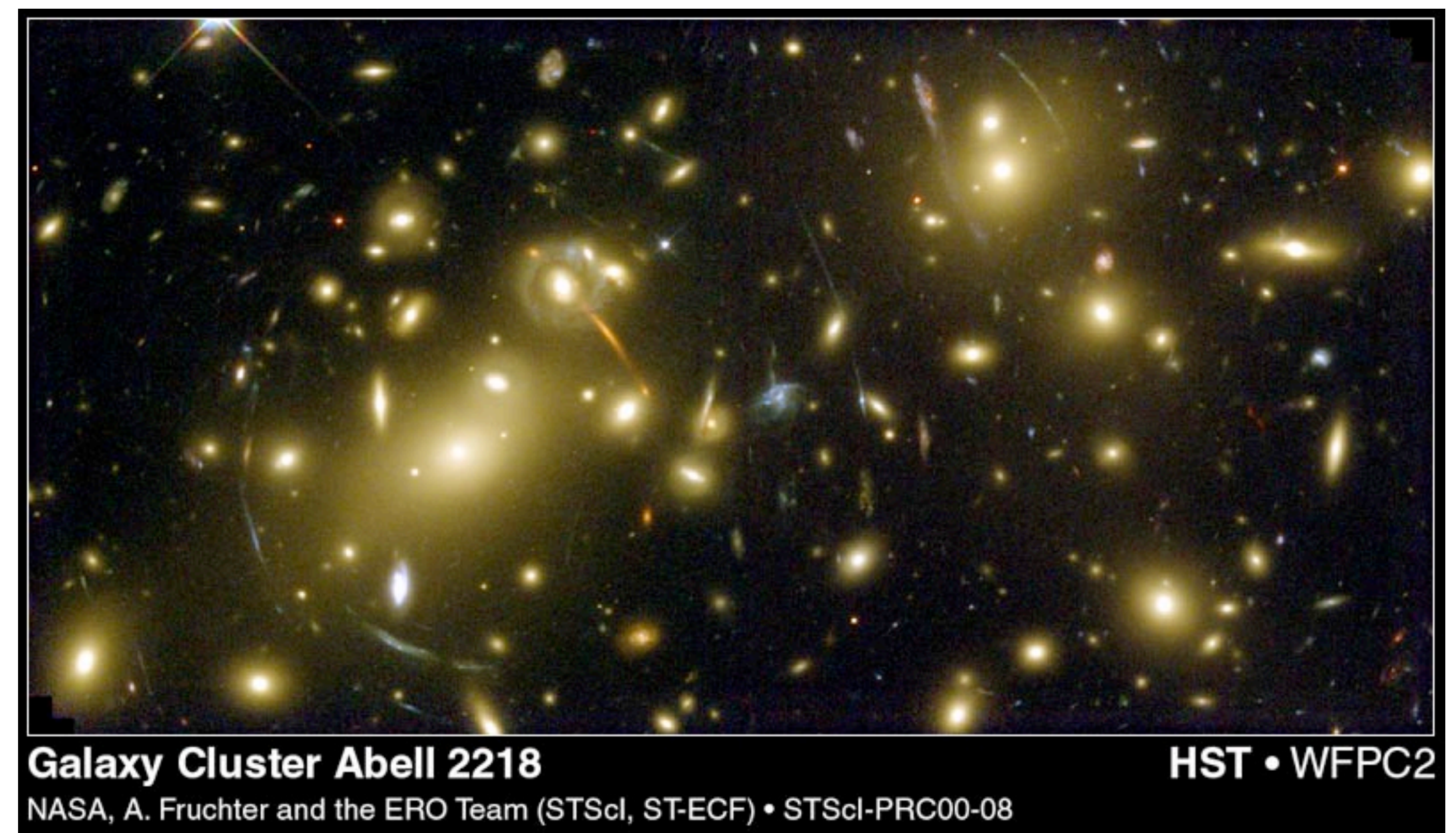
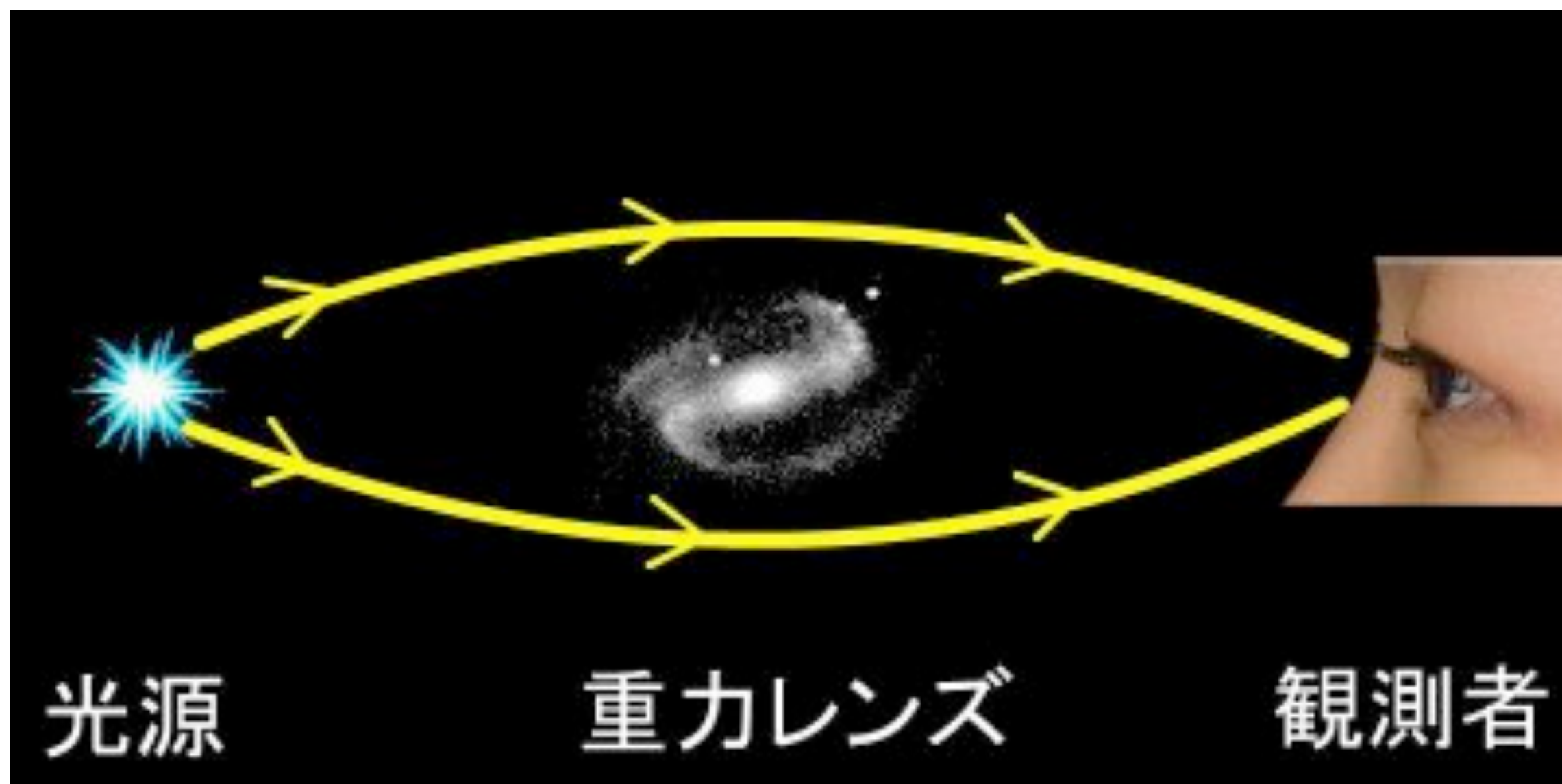


Vera Rubin



ダークマター存在の証拠 2

- 重力レンズ: 光が曲げられる。
 - 手前の銀河により、遠方の銀河が円弧状に曲がって見える。
 - 光学的観測による銀河の質量と曲がり方が合わない。
→ **見えない重力相互作用をする何かがたくさんある。**



ダークマターの候補 WIMP

- Weakly interacting massive particle.
 - **超対称性粒子** (ニュートラリーノ: フォティーノ、ジーノ、ヒグシーノの混合)などが候補。
- 弱い相互作用のスケールの生成・対消滅断面積として残留粒子を見積もると、観測量と一致する (**WIMPの奇跡**、最も有力な候補)。質量は $O(10^1 \sim 10^4)$ GeV。
- 素粒子物理学の観点でも、力の統一など様々な問題を解決する。
 - ▶ 詳細はLHCの物理などで話してもらえらると思う(多分)



他の候補 Axion

- Axionとは、強い相互作用におけるCP問題を解決するために導入された仮想粒子である。
- 標準理論の量子色力学(QCD)でのラグランジアンには、CP対称性を破る項が含まれている

$$\mathcal{L} = \theta \frac{g^2}{32\pi^2} G_{a\mu\nu} \tilde{G}^{a\mu\nu}$$

- この項は中性子の電気双極子モーメント(EDM)を生み出す。
→ 実験により厳しい制限: $\theta \lesssim 10^{-10}$

他の候補 Axion

- Axionとは、強い相互作用におけるCP問題を解決するために導入された仮想粒子である。
- 標準理論の量子色力学(QCD)でのラグランジアンには、CP対称性を破る項が含まれている

$$\mathcal{L} = \theta \frac{g^2}{32\pi^2} \tilde{G}_{\alpha\beta\gamma\delta} G^{\alpha\beta\gamma\delta}$$

- この項は中性子の電気双極子モーメント(EDM)を生み出す。
→ 実験により厳しい制限: $\theta \lesssim 10^{-10}$

- Peccei & Quinn(PQ)対称性の導入(PRL 38 (1977) 1440)。
→ PQ対称性が自発的に破れた時、この項が打ち消される。
→ この時に現れる擬Nambu-Goldstonボソンがaxion。

S.Weinberg, PRL 40 (1978) 223 & F.Wilczek, PRL 40 (1978) 271

他の候補 Axion

- Axionとは、強い相互作用におけるCP問題を解決するために導入された仮想粒子である。
- 標準理論の量子色力学(QCD)でのラグランジアンには、CP対称性を破る項が含まれている

$$\mathcal{L} = \theta \frac{g^2}{32\pi^2} \tilde{G}_{\alpha\beta\gamma\delta} G^{\alpha\beta\gamma\delta}$$

- この項は中性子の電気双極子モーメント(EDM)を生み出す。
→ 実験により厳しい制限: $\theta \lesssim 10^{-10}$

- Peccei & Quinn(PQ)対称性の導入(PRL 38 (1977) 1440)。
→ PQ対称性が自発的に破れた時、この項が打ち消される。
→ この時に現れる擬Nambu-Goldstonボソンがaxion。

S.Weinberg, PRL 40 (1978) 223 & F.Wilczek, PRL 40 (1978) 271

- QCD axionの質量 m_a と崩壊定数 f_a : $m_a f_a \sim m_\pi f_\pi$
→ Axionがダークマターなら質量は $10^{-6} \lesssim m_a \lesssim 10^{-3}$ eV。

他の候補 Axion

- Axionとは、強い相互作用におけるCP問題を解決するために導入された仮想粒子である。
- 標準理論の量子色力学(QCD)でのラグランジアンには、CP対称性を破る項が含まれている

$$\mathcal{L} = \theta \frac{g^2}{32\pi^2} \tilde{G}_{\alpha\beta\gamma\delta} G^{\alpha\beta\gamma\delta}$$

- この項は中性子の電気双極子モーメント(EDM)を生み出す。
→ 実験により厳しい制限: $\theta \lesssim 10^{-10}$

- Peccei & Quinn(PQ)対称性の導入(PRL 38 (1977) 1440).
→ PQ対称性が自発的に破れた時、この項が打ち消される。
→ この時に現れる擬Nambu-Goldstonボソンがaxion。

S.Weinberg, PRL 40 (1978) 223 & F.Wilczek, PRL 40 (1978) 271

- QCD axionの質量 m_a と崩壊定数 f_a : ~~$m_a f_a \sim m_\pi f_\pi$~~
→ Axionがダークマターなら質量は $10^{-6} \lesssim m_a \lesssim 10^{-3}$ eV。
- Axion like particles (ALPs): 質量と崩壊定数の制限をなくし、より自由度を増やしたもの。

ダークセクター探索

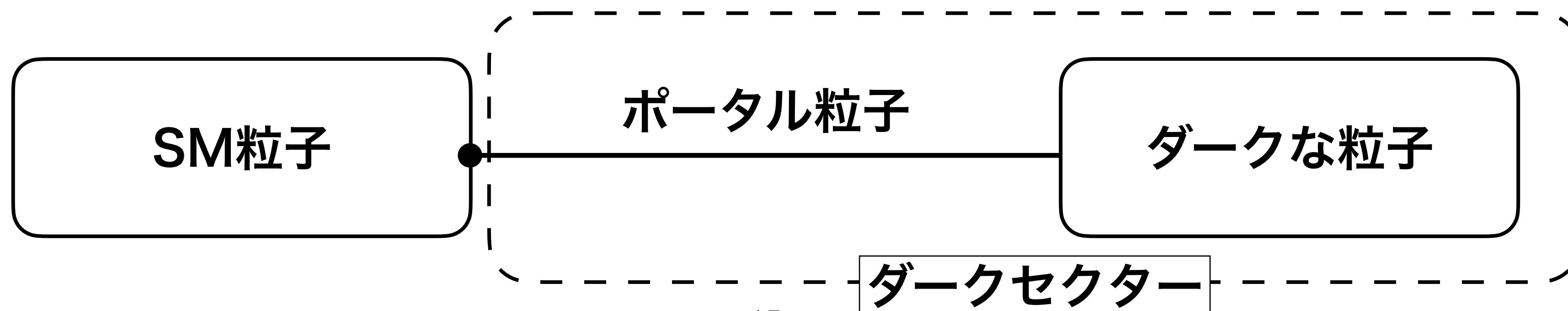
- WIMPの奇跡: $O(10^1 \sim 10^4)$ GeVの領域に集中して探索したが見つからなかった。

ダークセクター探索

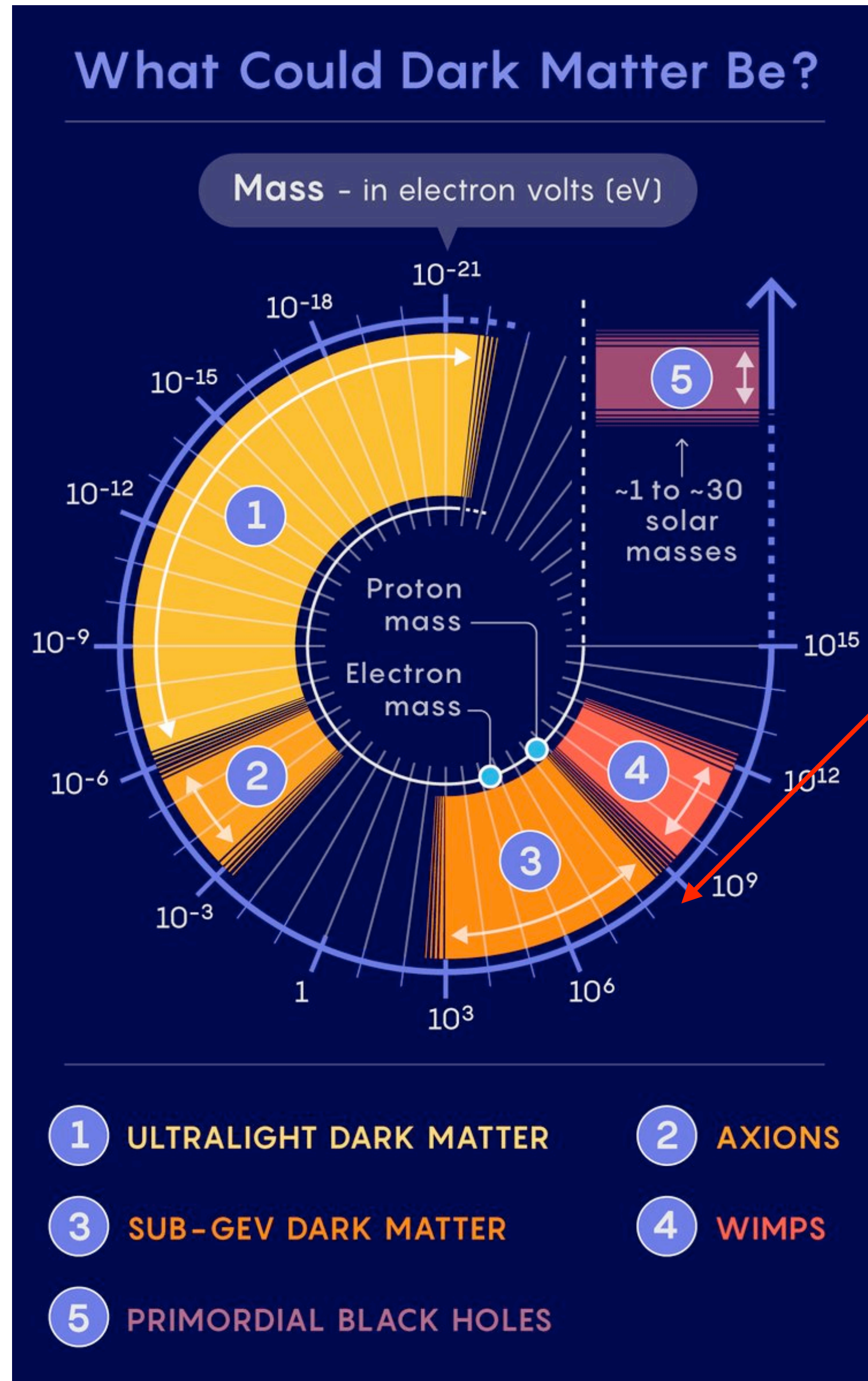
- WIMPの奇跡: $O(10^1 \sim 10^4)$ GeVの領域に集中して探索したが見つからなかった。
 - ▶ **もっと広く様々な方法で探索すべき!!**

ダークセクター探索

- WIMPの奇跡: $O(10^1 \sim 10^4)$ GeVの領域に集中して探索したが見つからなかった。
 - ▶ **もっと広く様々な方法で探索すべき!!**
- ダークセクターというアイデアが提案された。
 - ▶ SM粒子とダークな粒子が直接相互作用せず、粒子を媒介して(ポータル粒子)相互作用する。
 - ▶ 4種類のポータル粒子。
 - スカラーポータル: dark Higgsなど
 - 擬スカラーポータル: axion, ALPsなど
 - ベクターポータル: dark photon, Z' など
 - フェルミオンポータル: sterile neutrinosなど
 - ➔ ダークマターのみならず、例えばミューオン $g-2$ のアノマリーの説明も。



Belle IIでのダークセクター探索



- Belle IIの重心系エネルギーは $\sqrt{s} = 10.58$ GeV。
→ ~10 GeVまでの領域でのダークセクター探索が可能。
- Belle IIでの物理プロセス
 - $e^+e^- \rightarrow \text{SM particles} + X$ (visible or invisible)
e.g. $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-Z'$, $Z' \rightarrow \text{visible or invisible}$.
 - $B \rightarrow \text{SM particles} + X$ (visible or invisible)
e.g. $B \rightarrow Ka$

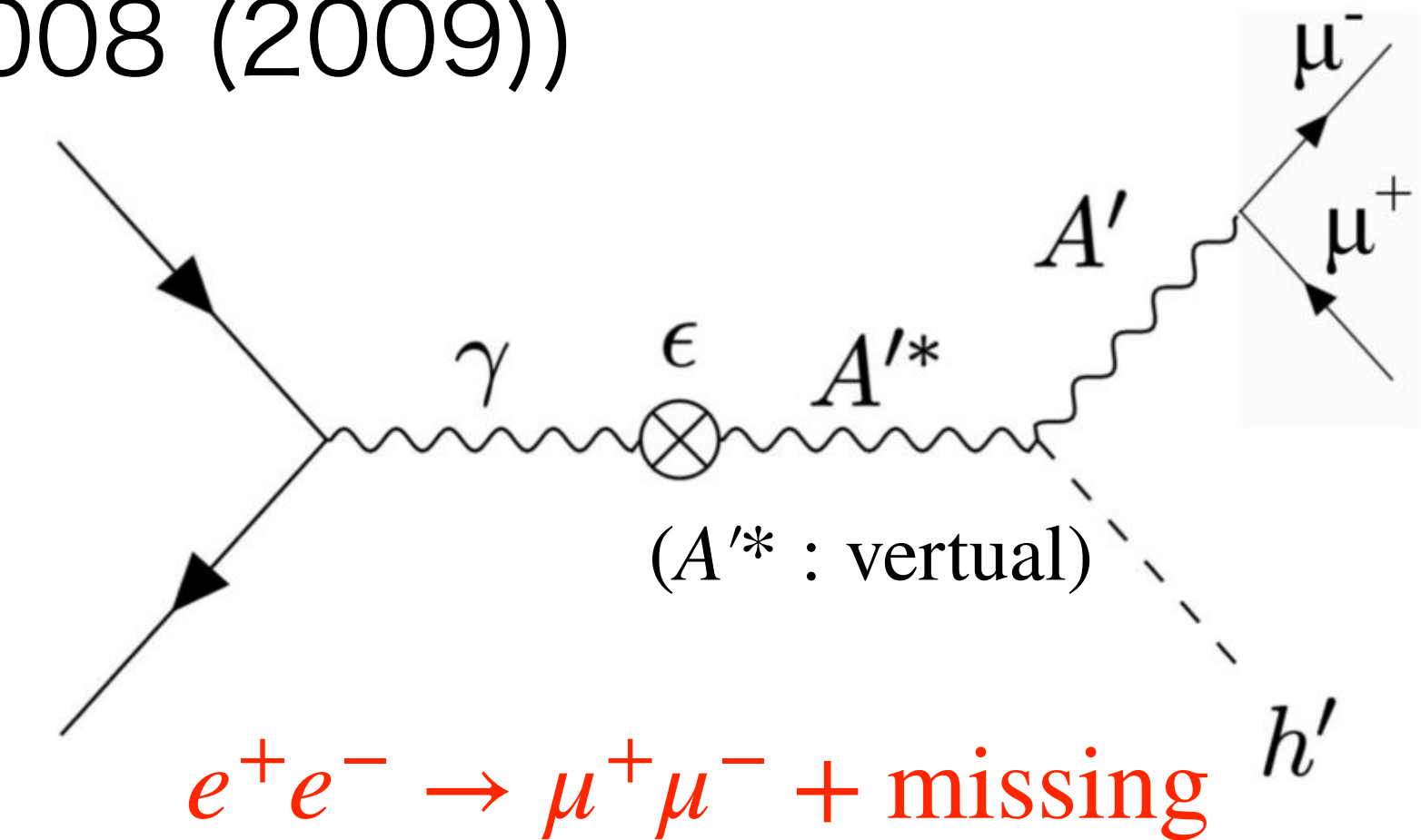
<https://twitter.com/QuantaMagazine/status/1560745942533476352>

Belle IIでのダークセクター探索 (ICHEP2022や今後期待される結果)

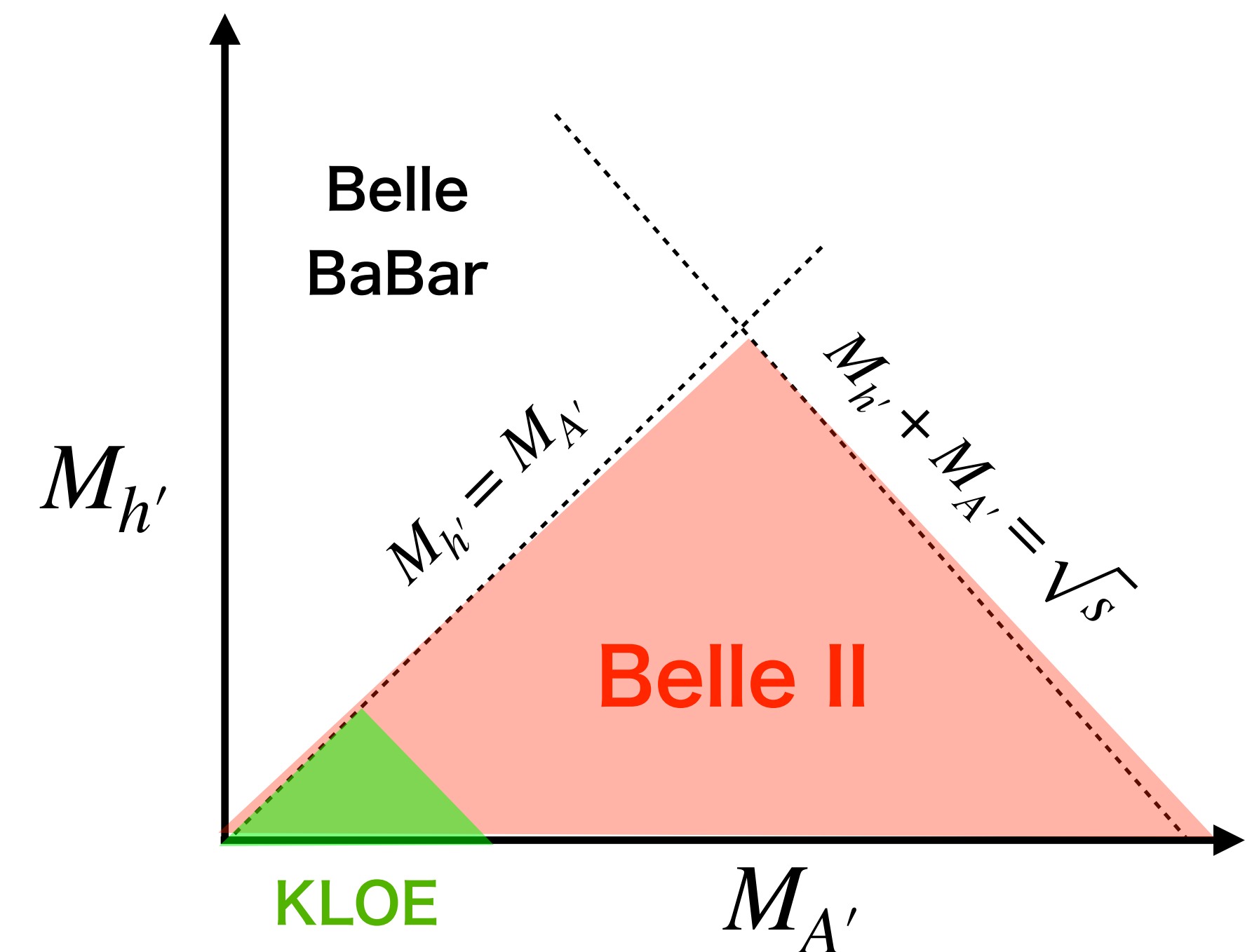
ダークヒッグス探索: $e^+e^- \rightarrow A'h'$

- ダークヒッグスのプロセス $e^+e^- \rightarrow A'h'$ (Phys. Rev. D 79, 115008 (2009))

- ダークフォトン A'
 - ▶ kinematic mixing ϵ でSM粒子とカップルする。
- ダークヒッグス h'
 - ▶ 自発的対称性の破れによって $M_{A'}$ を与える。
 - ▶ カップリング定数 α_D
 - ➔ 反応断面積 $\sigma \propto \epsilon^2 \alpha_D$.

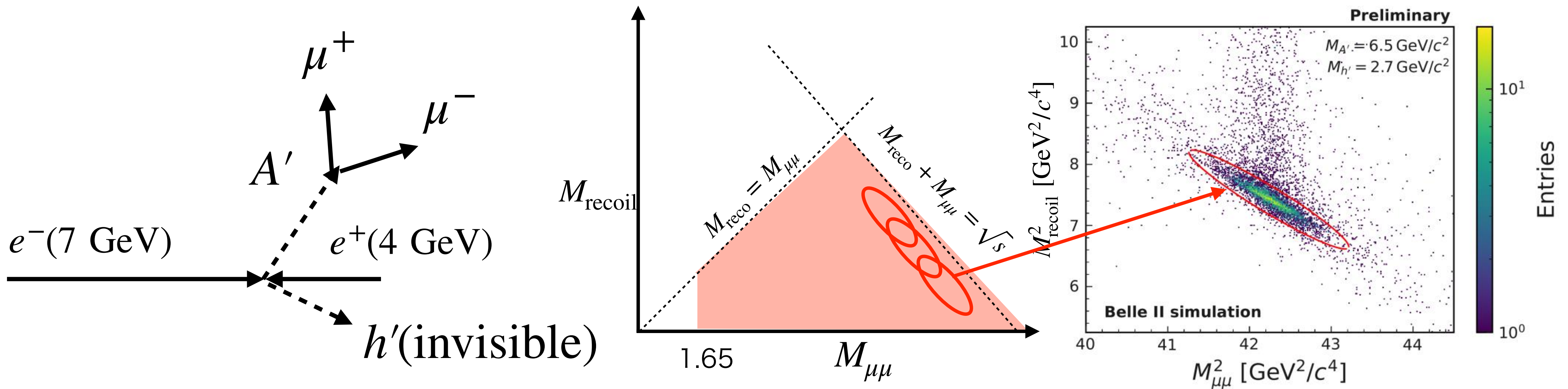


- $M_{h'} > M_{A'}$: ダークヒッグスはvisible: $h' \rightarrow$ two dark photons
 - ➔ BelleとBaBarにより制限 ($\epsilon^2 \alpha_D < 10^{-10} \sim 10^{-8}$).
- $M_{h'} < M_{A'}$: ダークヒッグスは**invisible**
 - ➔ KLOEにより探索 ($M_{A'} < 900 \text{ MeV}/c^2$, $\epsilon^2 \alpha_D < 10^{-9} \sim 10^{-8}$).
 - ➔ **探索されていない領域が大きい。**



ダークヒッグス探索: $e^+e^- \rightarrow A'h'$ 解析

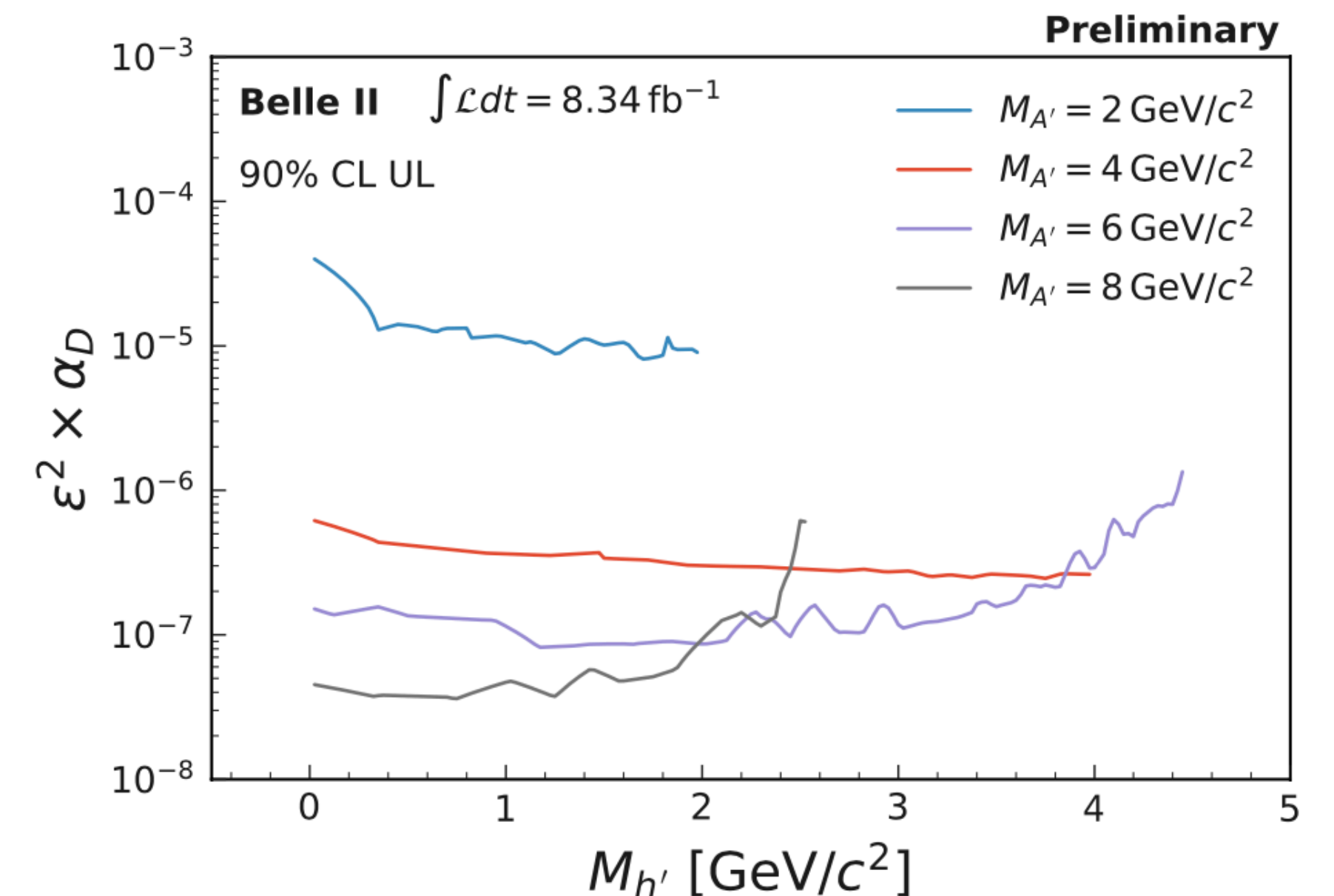
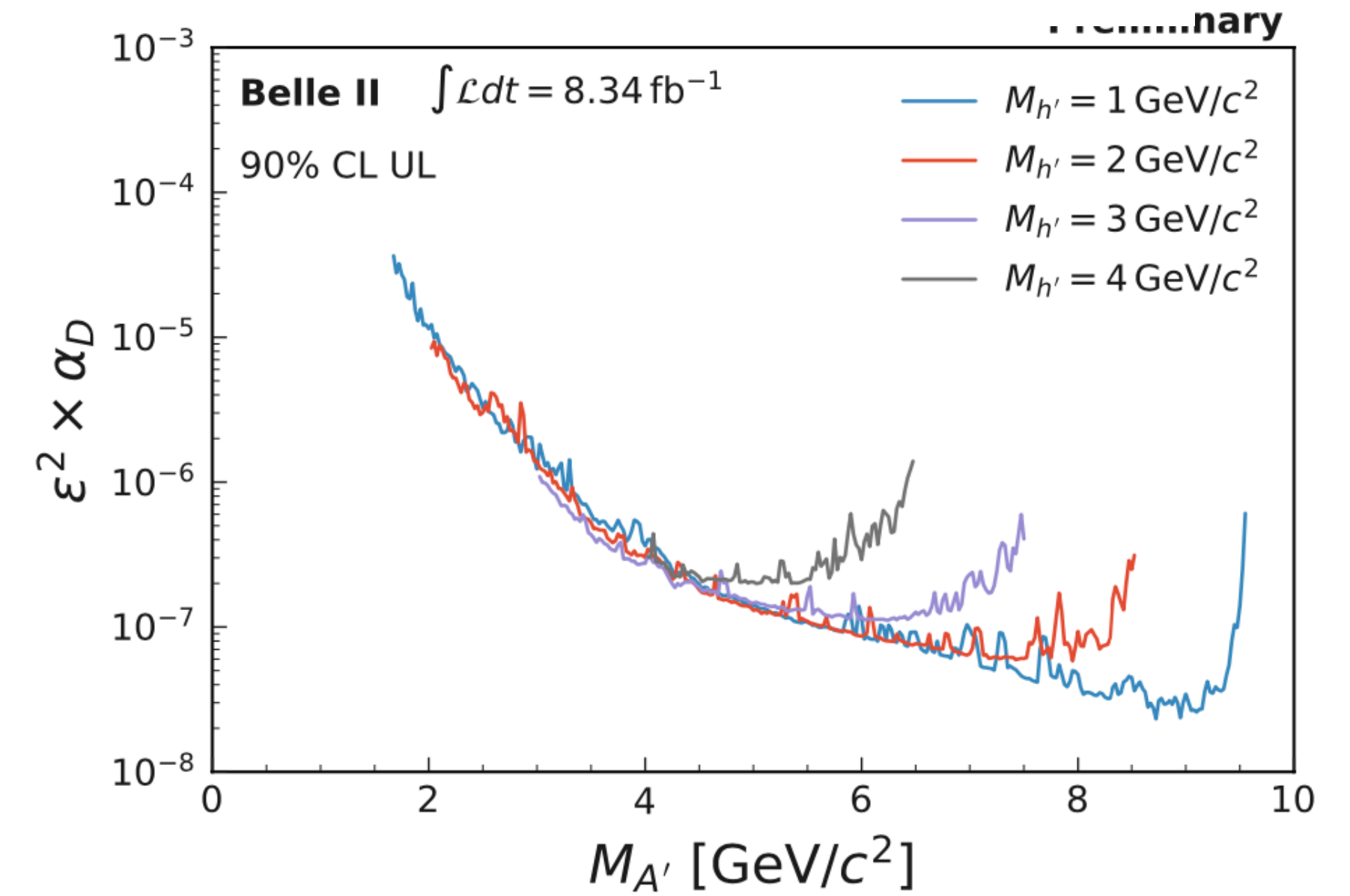
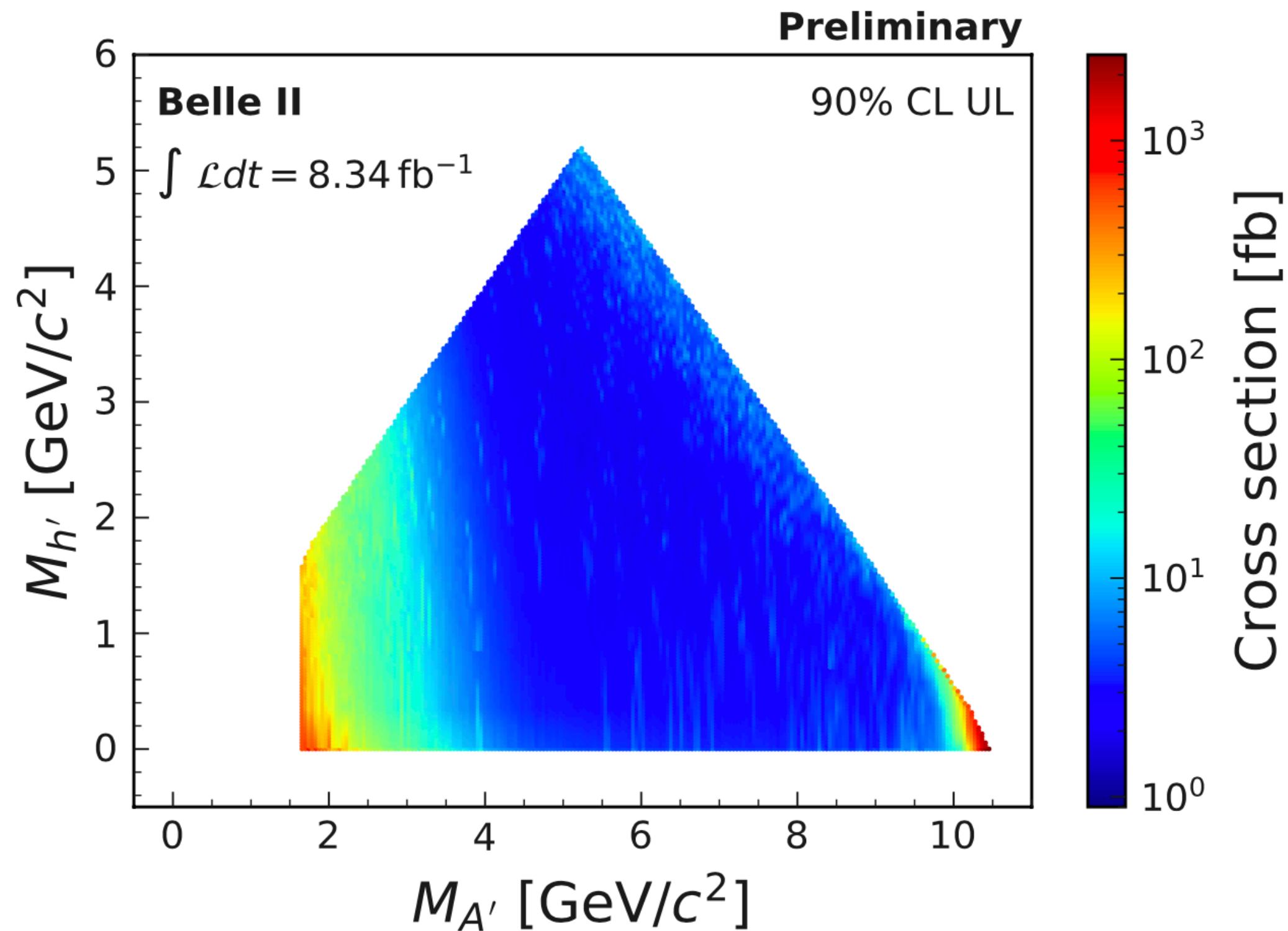
- データセット: 8.34 fb^{-1} (2019)
- 終状態: $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- + \text{missing}$
- $M_{\mu\mu}$ vs M_{recoil} プロットのスキャン \Rightarrow 約9,000の楕円形の探索ウィンドウ。
 - ダークフォトン: $A' \rightarrow \mu^+\mu^-$, trigger efficiencyのため、 $M_{\mu\mu} > 1.65 \text{ GeV}/c^2$.
 - ダークヒッグス: invisible, ミューオン対より M_{recoil} 得る ($P_{h'} = P_{e^+e^-} - P_{\mu^+} - P_{\mu^-}$)
 - ▶ 楕円内で予想されるバックグラウンドを超える事象があるかを調べる。



ダークヒッグス探索: $e^+e^- \rightarrow A'h'$ 結果

- バックグラウンドを超える有意な信号は観測されなかった。
- 90% C.L.の上限値を σ と $\epsilon^2\alpha_D$ にセットした。
- $1.65 < M_{A'} < 10.51 \text{ GeV}/c^2$ にて世界初の結果。

➡ [arXiv:2207.00509](https://arxiv.org/abs/2207.00509)



他のダークセクター—解析

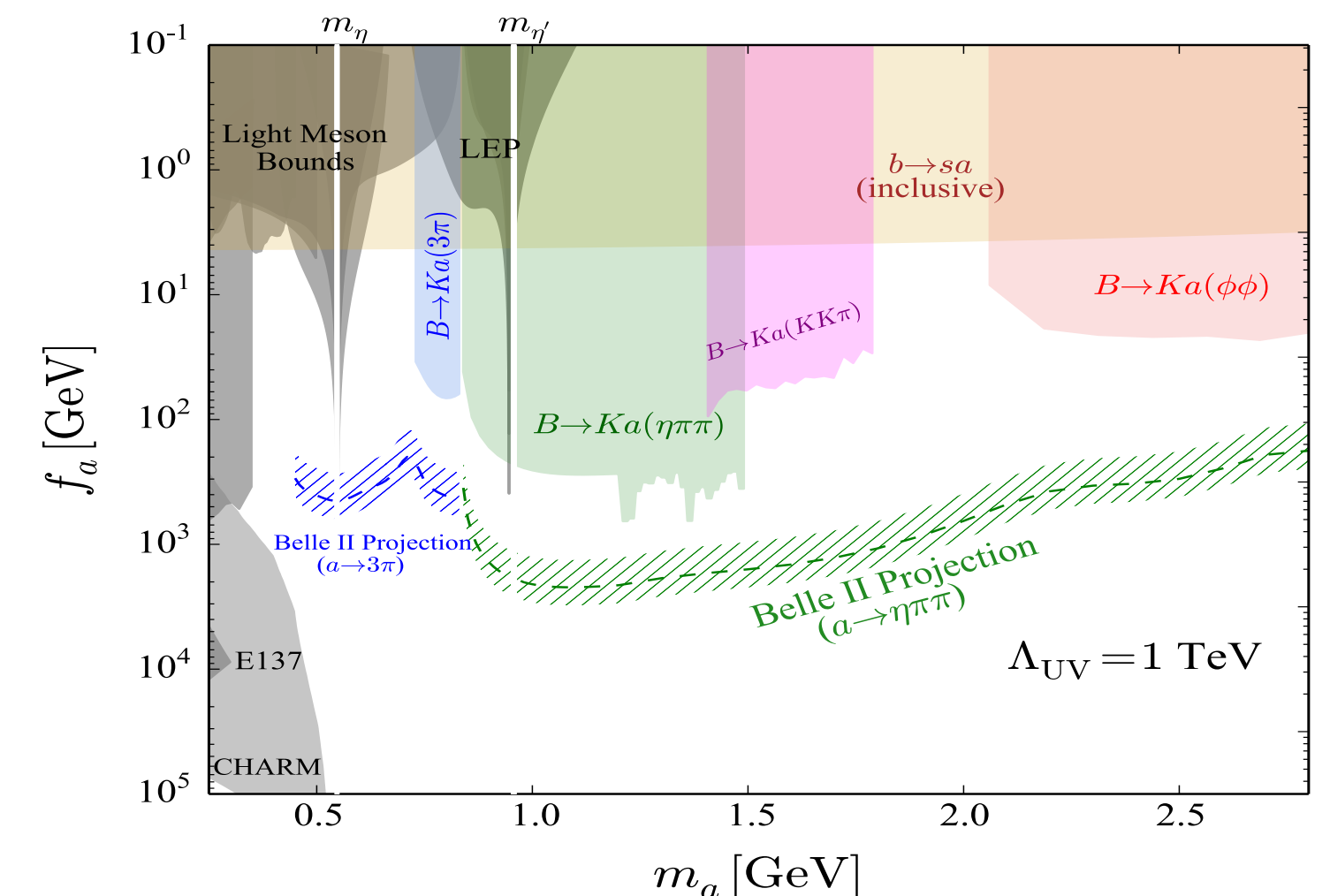
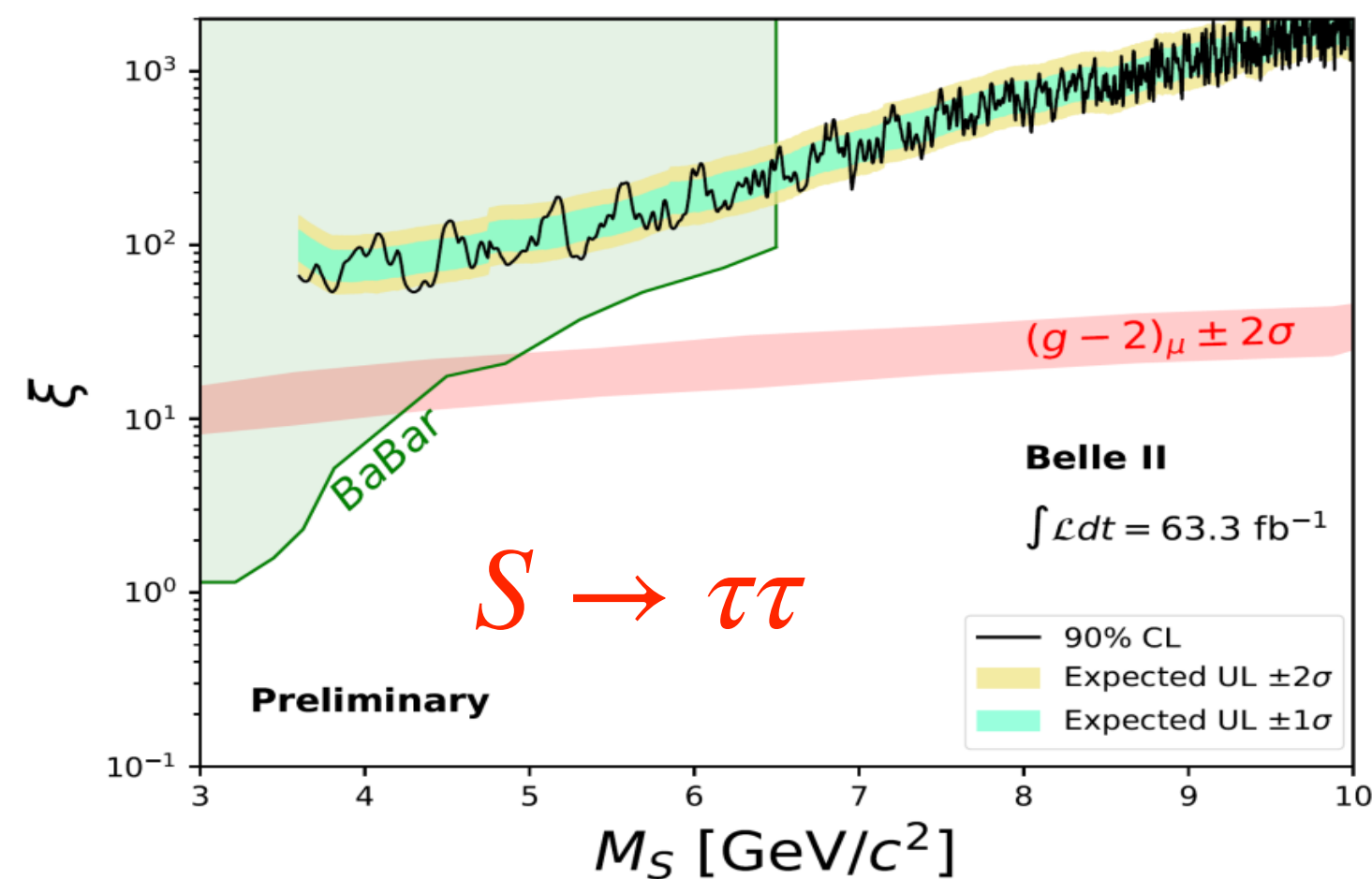
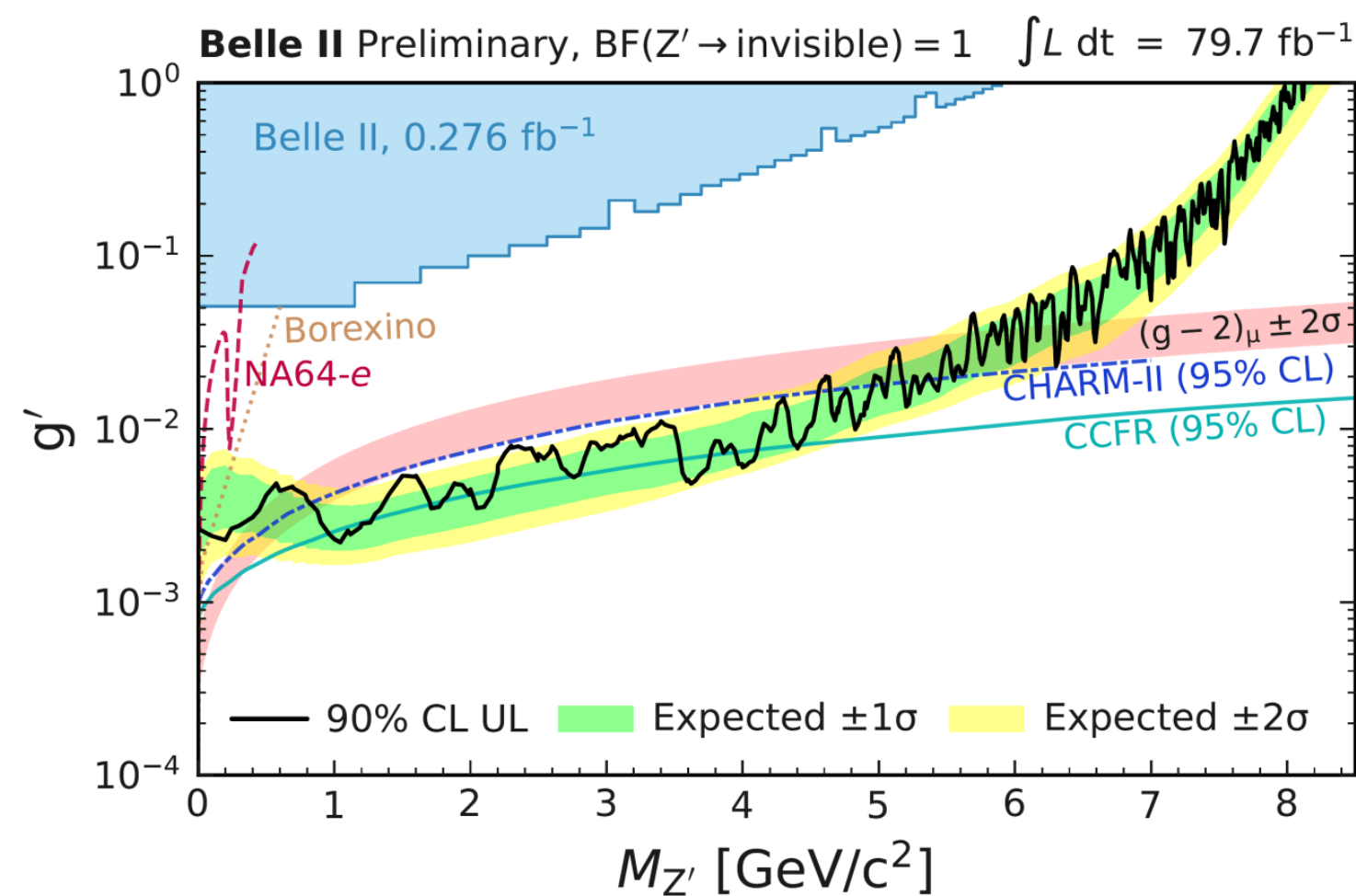
- 他のダークセクターモデルも鋭意解析中。

- e^+e^- 反応

- ▶ $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-Z', Z' \rightarrow \text{invisible}(\nu\bar{\nu} \text{ or } \chi\chi)$
- ▶ $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-X, X \rightarrow \tau^+\tau^-$
- ▶ $e^+e^- \rightarrow \gamma A', A' \rightarrow \text{invisible}$ などなど

- B中間子の崩壊

- ▶ $B \rightarrow Ka$: heavy QCD axion ($a \rightarrow \text{hadrons}$), ALPs ($a \rightarrow \gamma\gamma$)
- ▶ $B \rightarrow KS$: dark scalar ($S \rightarrow \ell^+\ell^-$) などなど



まとめ

- ダークマターとは目に見えない重力相互作用をするもの。
- 数々の観測事実より、何かがあることはわかっているが、直接観測はいまだにできていない。
- ダークセクター解析: より広い範囲を様々な方法で探索する。
 - ▶ その中でBelle IIは中心的な役割を担っている。
- **Belle IIでは、様々なダークセクター解析を行っている。**
 - Dark Higgsstrahlung: [arXiv: 2207.00509](https://arxiv.org/abs/2207.00509).
 - $Z' \rightarrow \text{invisible}$ \Rightarrow 論文の準備中。
 - $Z', S, \text{ALP} \rightarrow \tau\tau$
- 他のダークセクターモデルも鋭意解析中。
 - \rightarrow 今後もworld leadingな結果が期待される。**

Backup

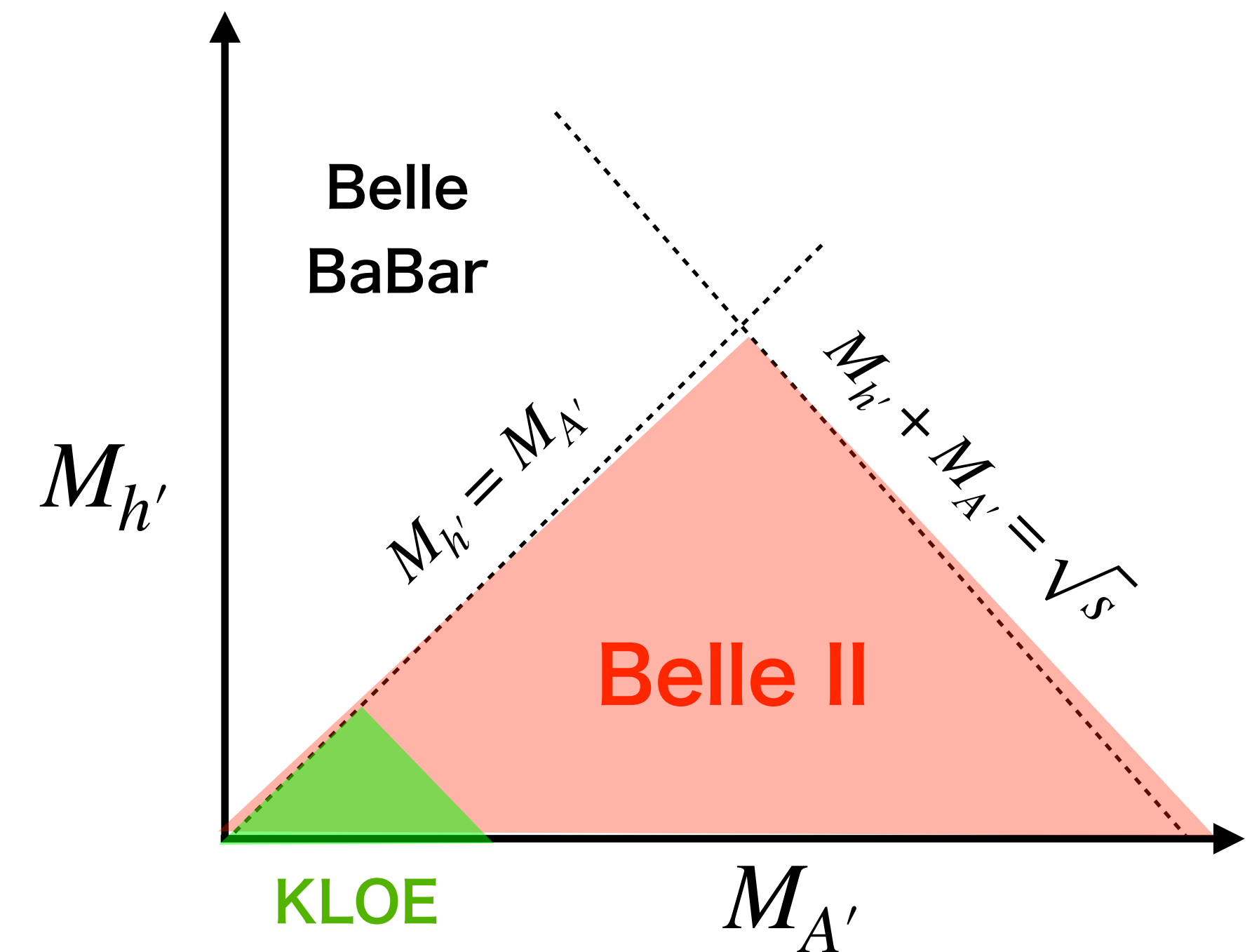
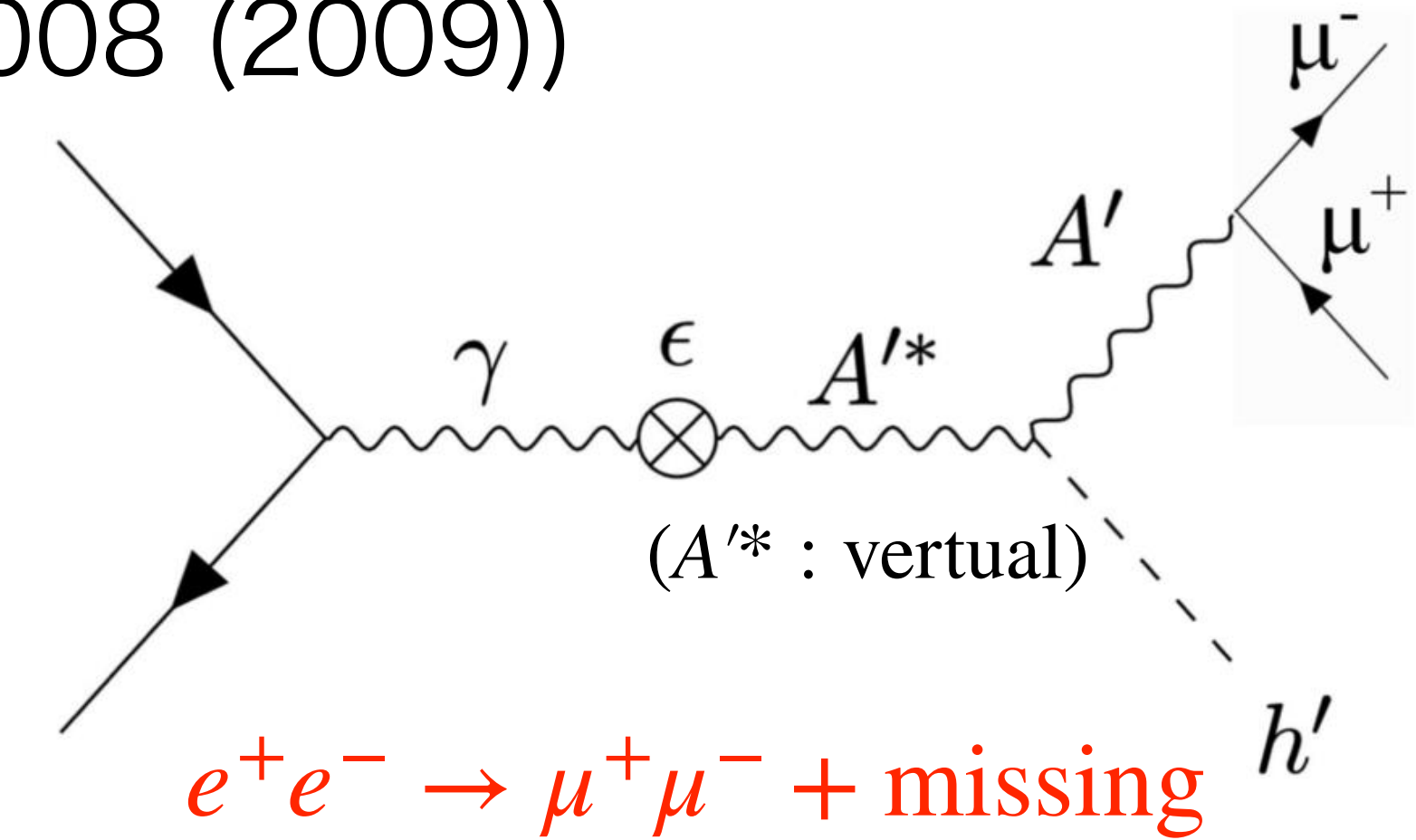
ダークヒッグス探索: $e^+e^- \rightarrow A'h'$

- ダークヒッグスのプロセス $e^+e^- \rightarrow A'h'$ (Phys. Rev. D 79, 115008 (2009))

- ダークフォトン A'
 - ▶ kinematic mixing ϵ でSM粒子とカップルする。
- ダークヒッグス h'
 - ▶ 自発的対称性の破れによって $M_{A'}$ を与える。
 - ▶ 通常のヒッグスとは混合しない。
 - ▶ カップリング定数 α_D
 - ➔ 反応断面積 $\sigma \propto \epsilon^2 \alpha_D$.

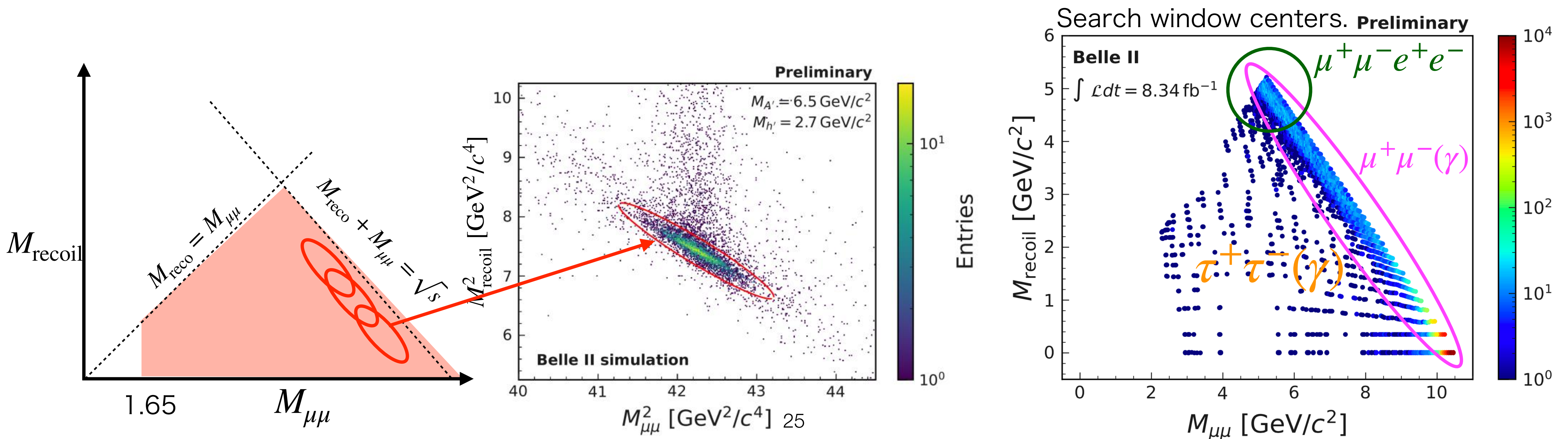
- $M_{h'} > M_{A'}$: ダークヒッグスはvisible: $h' \rightarrow$ two dark photons
 - ➔ BelleとBaBarにより制限 ($\epsilon^2 \alpha_D < 10^{-10} \sim 10^{-8}$).

- $M_{h'} < M_{A'}$: ダークヒッグスはinvisible
 - ➔ KLOEにより探索 ($M_{A'} < 900 \text{ MeV}/c^2$, $\epsilon^2 \alpha_D < 10^{-9} \sim 10^{-8}$).
 - ➔ 探索されていない領域が大きい。



ダークヒッグス探索: $e^+e^- \rightarrow A'h'$ 解析

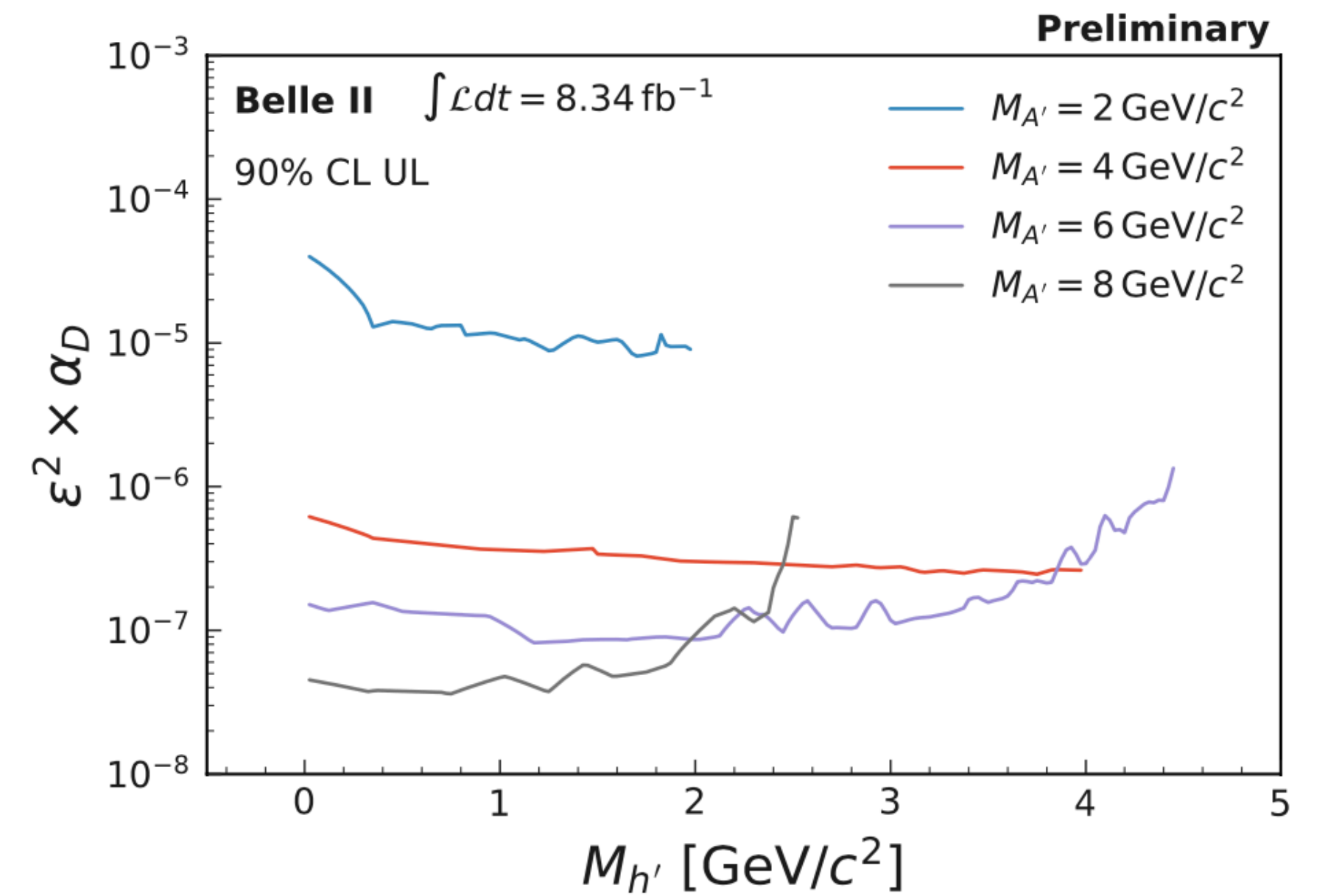
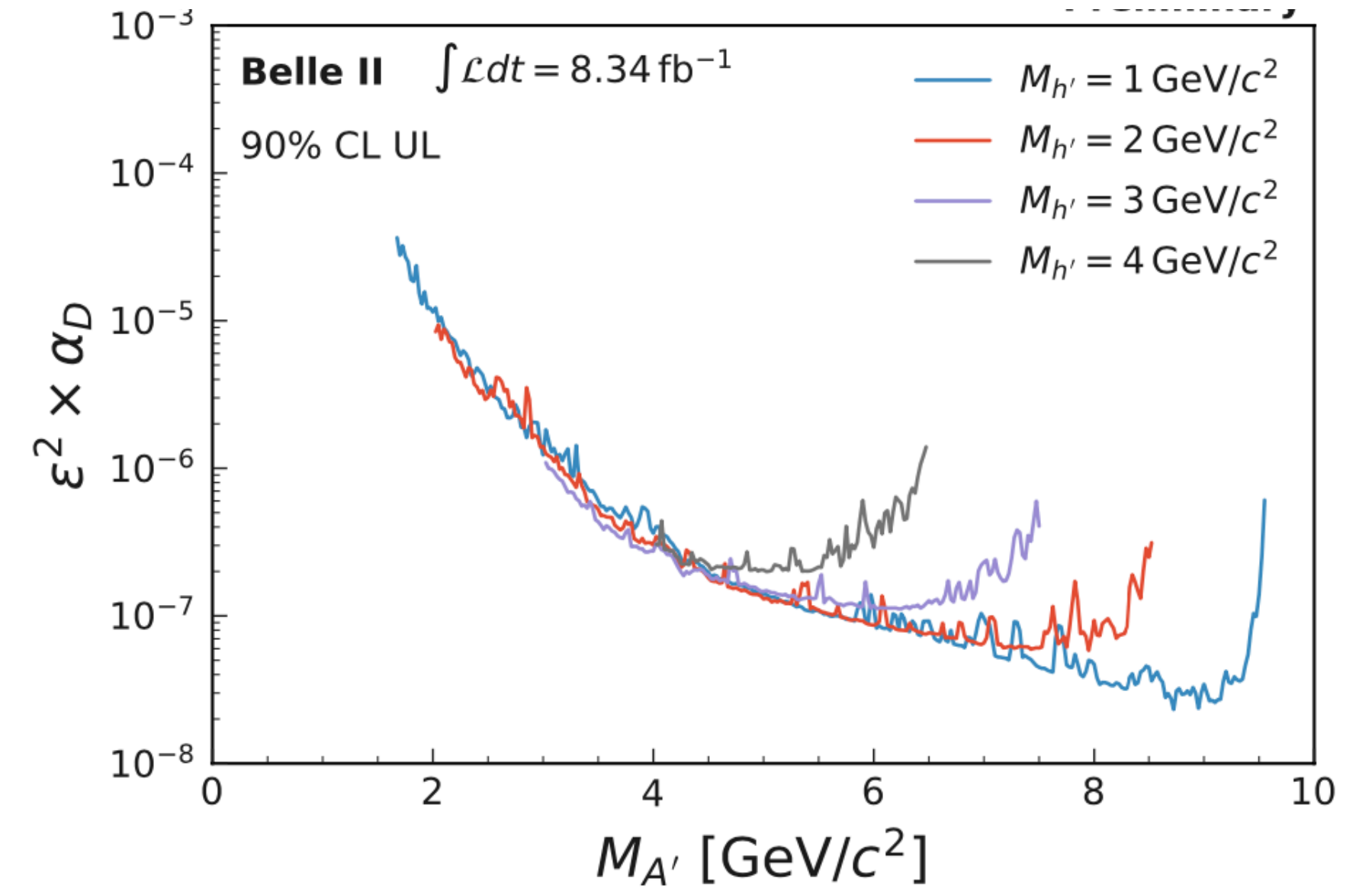
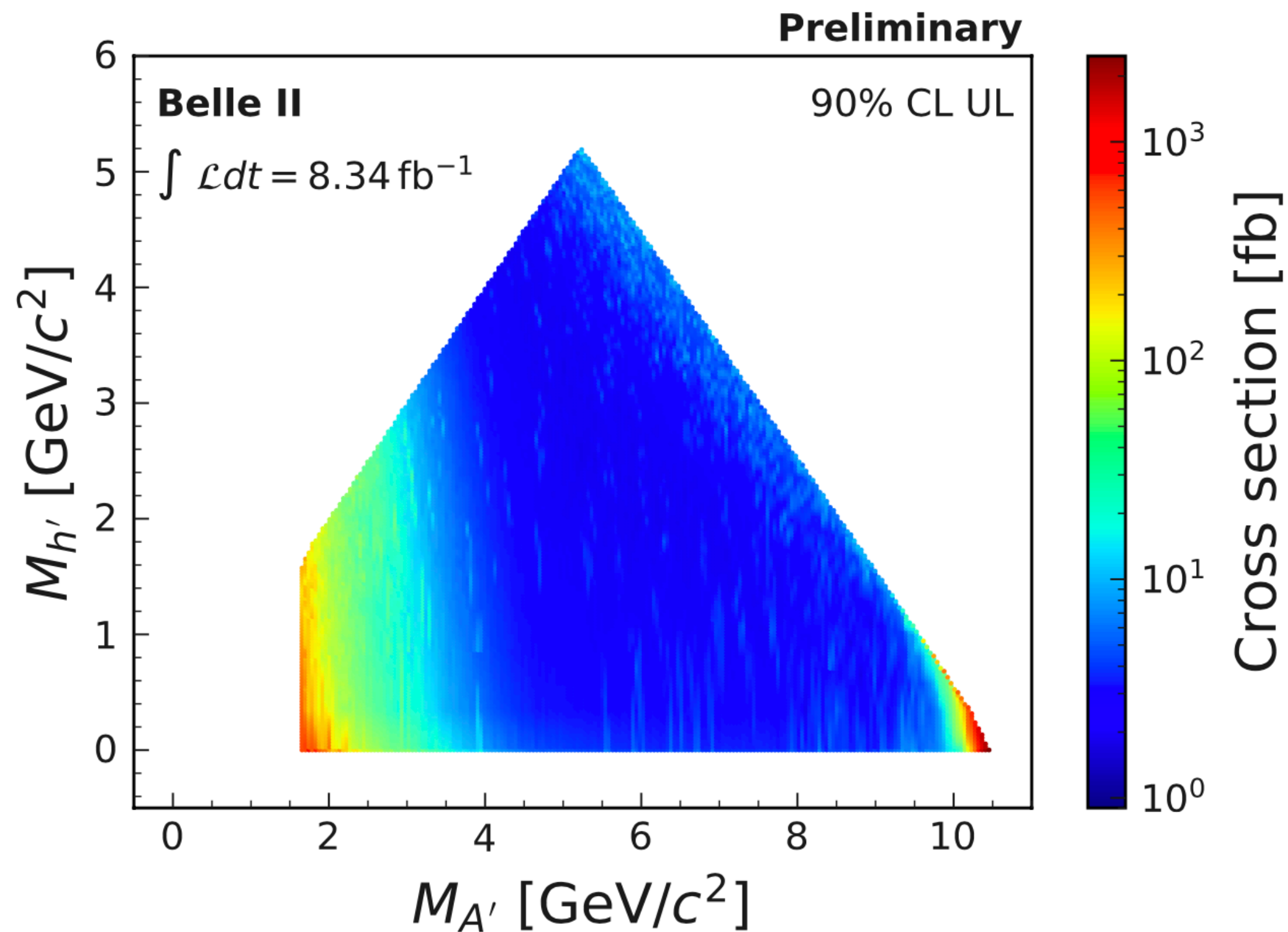
- データセット: 8.34 fb^{-1} (2019)
- トリガー ($e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- + \text{missing}$): 2つのトラック、 $\Phi > 90^\circ$ 、no Bhabha。
- $M_{\mu\mu}$ vs M_{recoil} プロットのスキャン \Rightarrow 約9,000の楕円形の探索ウィンドウ。
 - ダークフォトン: $A' \rightarrow \mu^+\mu^-$, trigger efficiencyのため、 $M_{\mu\mu} > 1.65 \text{ GeV}/c^2$ 。
 - ダークヒッグス: invisible, ミューオン対より M_{recoil} 得る ($P_{h'} = P_{e^+e^-} - P_{\mu^+} - P_{\mu^-}$)
- バックグラウンド: $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-(\gamma)$ (79%), $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-(\gamma)$ (18%), $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-e^+e^-$ (3%)



ダークヒッグス探索: $e^+e^- \rightarrow A'h'$ 結果

- 有意な信号は観測されなかった。
- 90% C.L.の上限値を σ と $\epsilon^2\alpha_D$ にセットした。
- $1.65 < M_{A'} < 10.51 \text{ GeV}/c^2$ にて世界初の結果。

➡ [arXiv:2207.00509](https://arxiv.org/abs/2207.00509)



Z' in $L_\mu - L_\tau$ Extension Model

- $L_\mu - L_\tau$ extension model (PRD 89 113004 (2014), JHEP 12 (2016) 106)

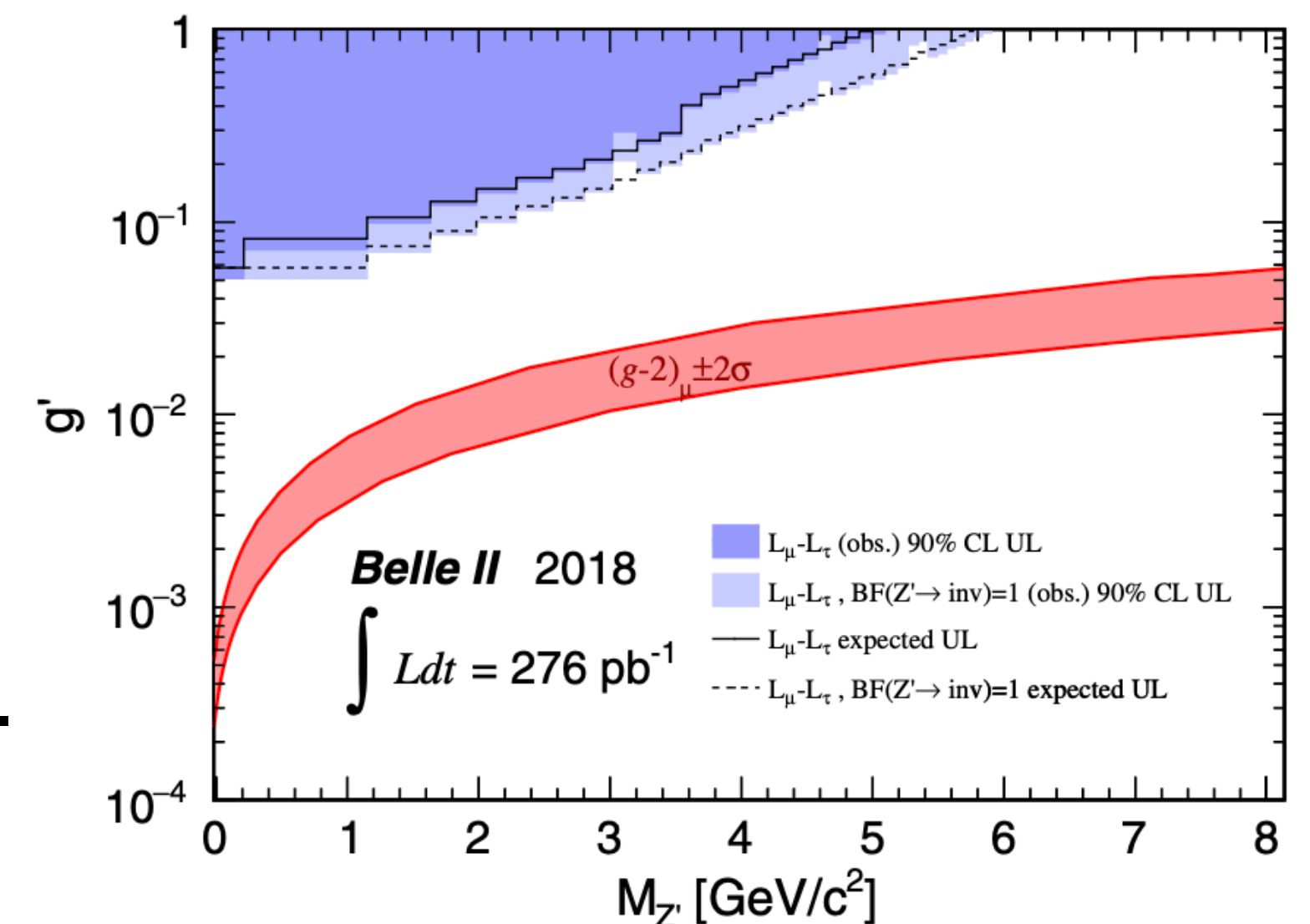
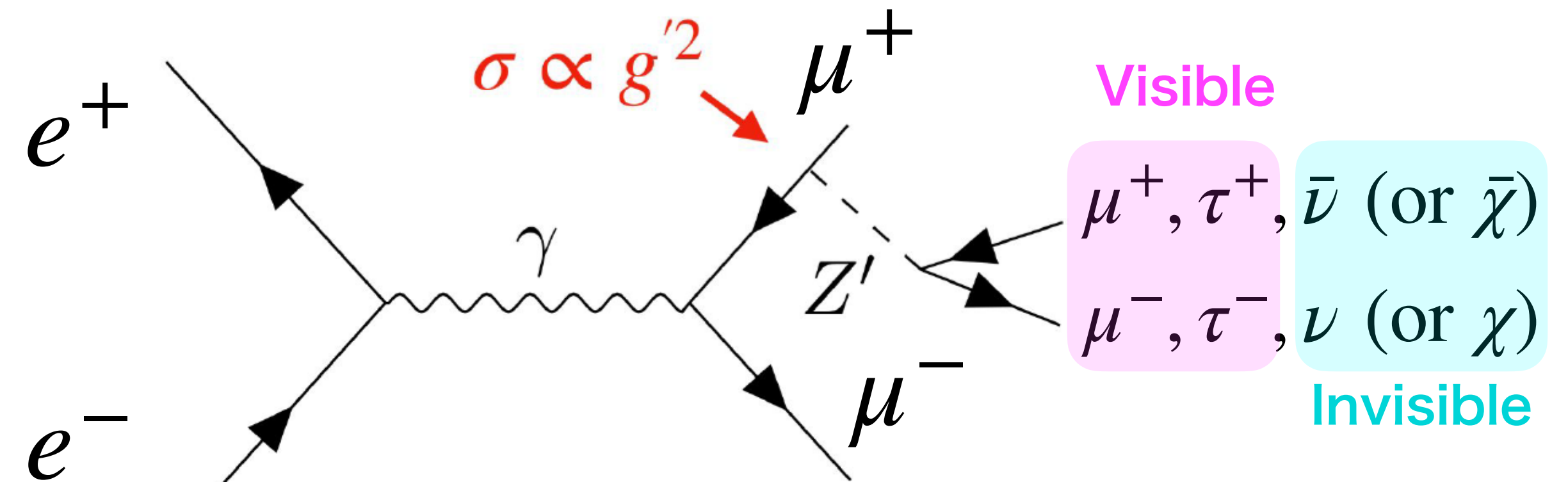
- ベクターボソン Z' , 第2, 3世代のレプトンとカップル。
- 断面積はカップリング定数 g' の二乗に比例。

- 以下の問題が解決できるかもしれない

- ダークマター
 - ▶ ダークマターの質量が Z' の半分以下なら、
 $BF(Z' \rightarrow \text{invisible}) \approx 100\%$.
- ミューオン $g-2$ のアノマリー
- LHCbの結果 (R_K, R_{K^*}).

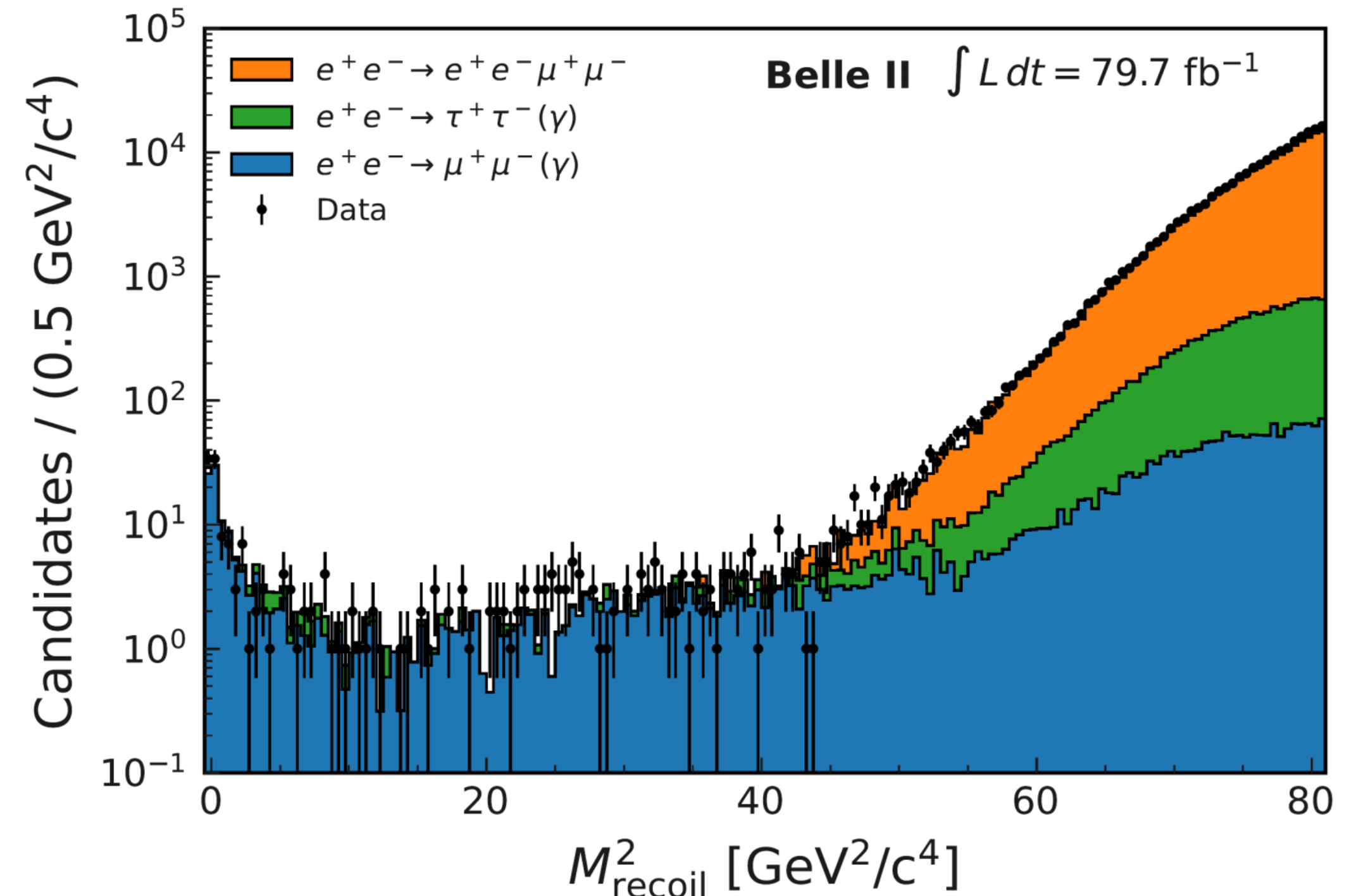
- 今回の結果

- $Z' \rightarrow \text{invisible}$ ($e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- + \text{missing}$)
 - ▶ Initial results: PRL 124, 141801 (2020) (276 pb⁻¹).
- $Z' \rightarrow \tau\tau$ ($e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-Z'$)



Invisible Z' 解析

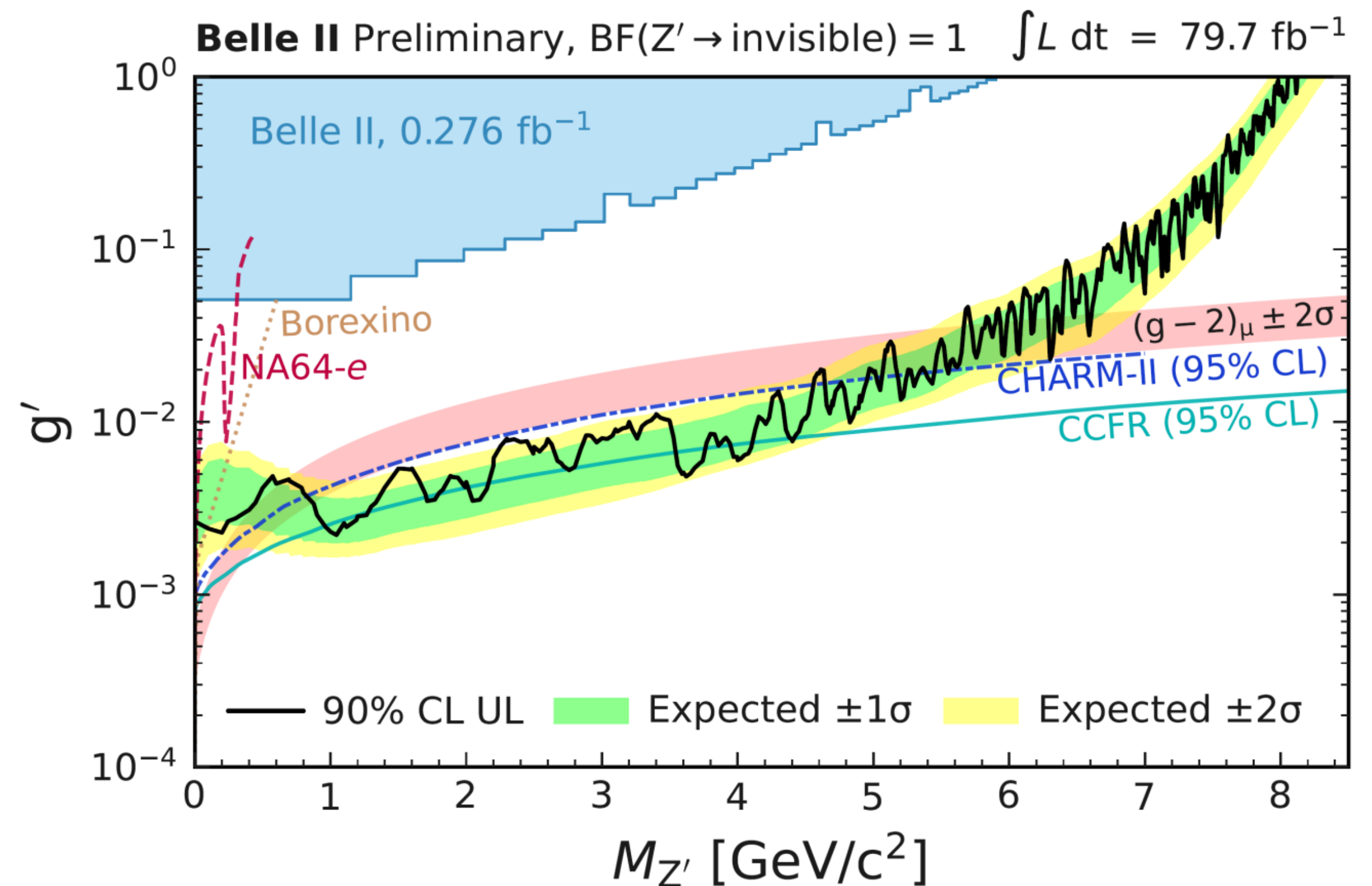
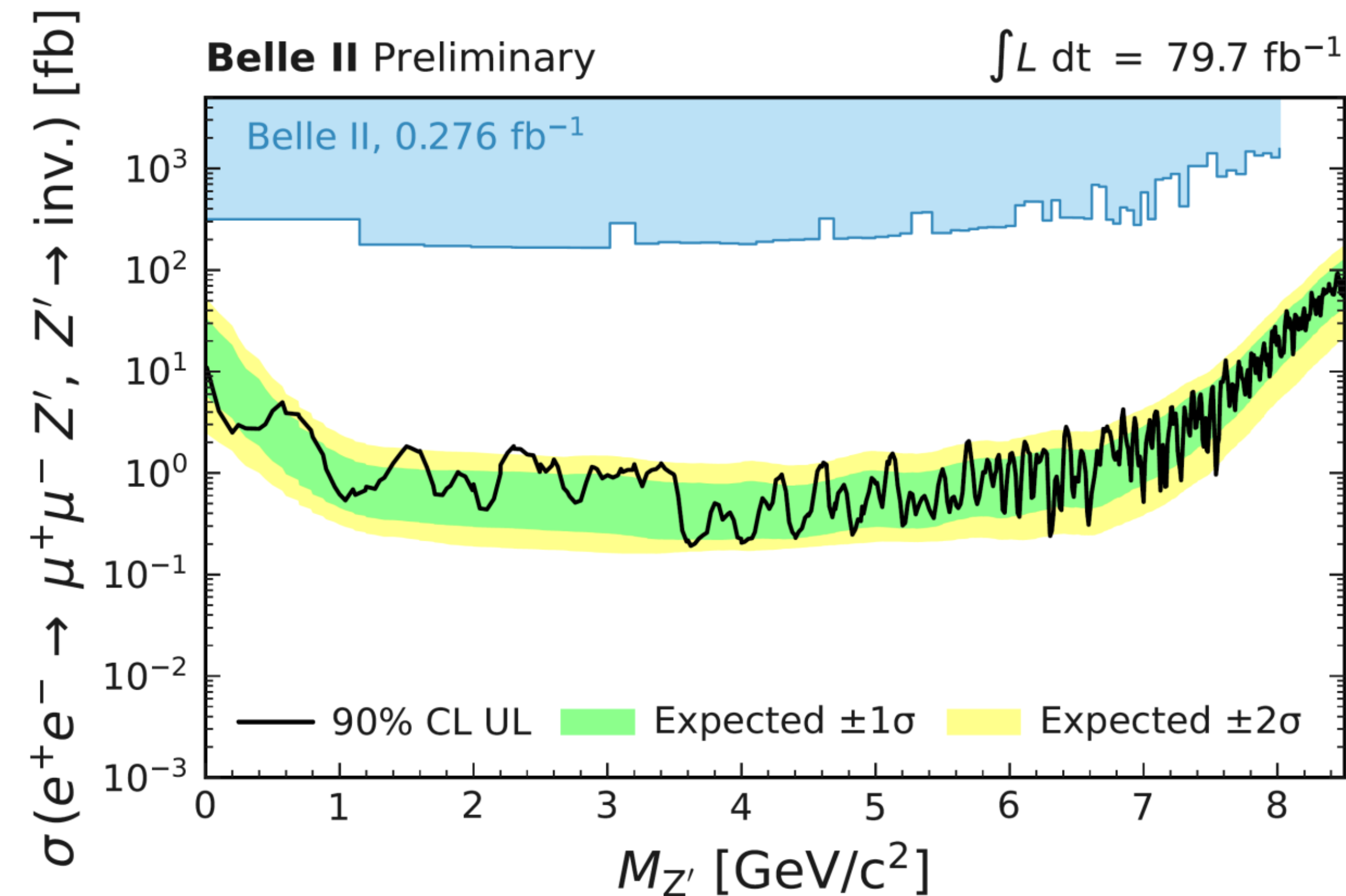
- 今回は2019-2020年のデータ (79.7 fb^{-1})を使用。
 - ➔ ニューラルネット (NN)を導入し、バックグラウンド除去効率が改善された。
- Recoil mass $M_{\text{recoil}} (P_{Z'} = P_{e^+e^-} - P_{\mu^+} - P_{\mu^-})$ にピークを探索する。
- トリガー ($e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- + \text{missing}$): 2つのトラック、 $\Phi > 90^\circ$ 、no Bhabha。
- バックグラウンドは $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-(\gamma)$, $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-(\gamma)$, $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-e^+e^-$ 。
- 3つのコントロールサンプル。
 - ▶ $\mu^+\mu^-\gamma$: 事象選択とNN(低質量領域)。
 - ▶ $e^+\mu^-$: 事象選択とNN(中~高質量領域)。
 - ▶ $e^+e^-(\gamma)$: γ veto。



Invisible Z' の解析結果

- 有意な信号は見られなかった。
- 90% C.L.上限値を断面積 σ とカップリング定数 g' セット。

→ $0.8 < M_{Z'} < 5.0 \text{ GeV}/c^2$ において、このモデルによる $(g-2)_\mu$ のアノマリーの起源は否定された。

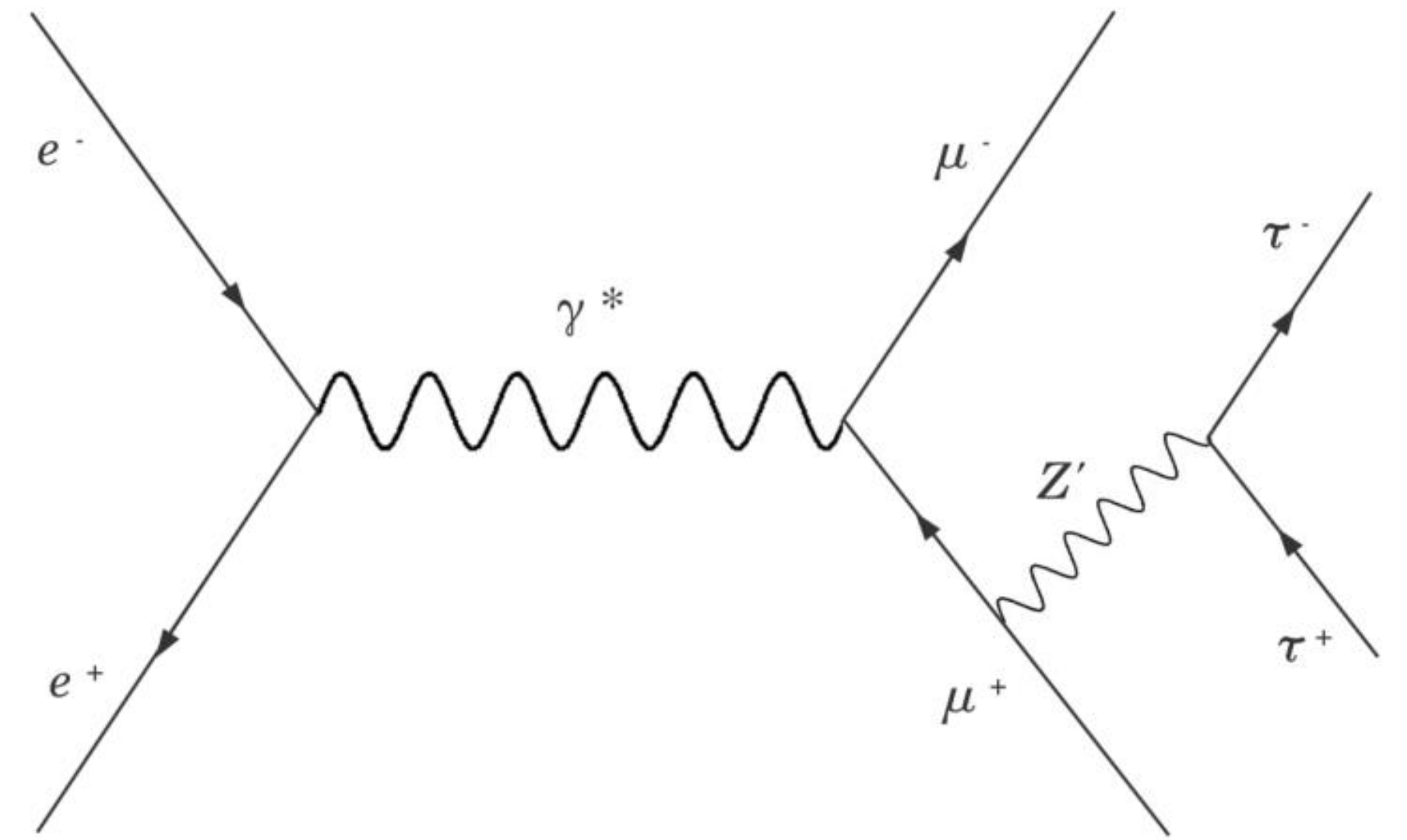


$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-X, X \rightarrow \tau\tau$ 探索

- $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-X, X \rightarrow \tau\tau$ 探索、 X は
 - Z' : $L_\mu - L_\tau$ extension model.
 - S: レプトフィリックスカラーモデル, PRL 125, 181801 (2020).
 - レプトフィリックなALP: JHEP12 (2017) 044 ($a \rightarrow \gamma\gamma$ とは異なったモデル)

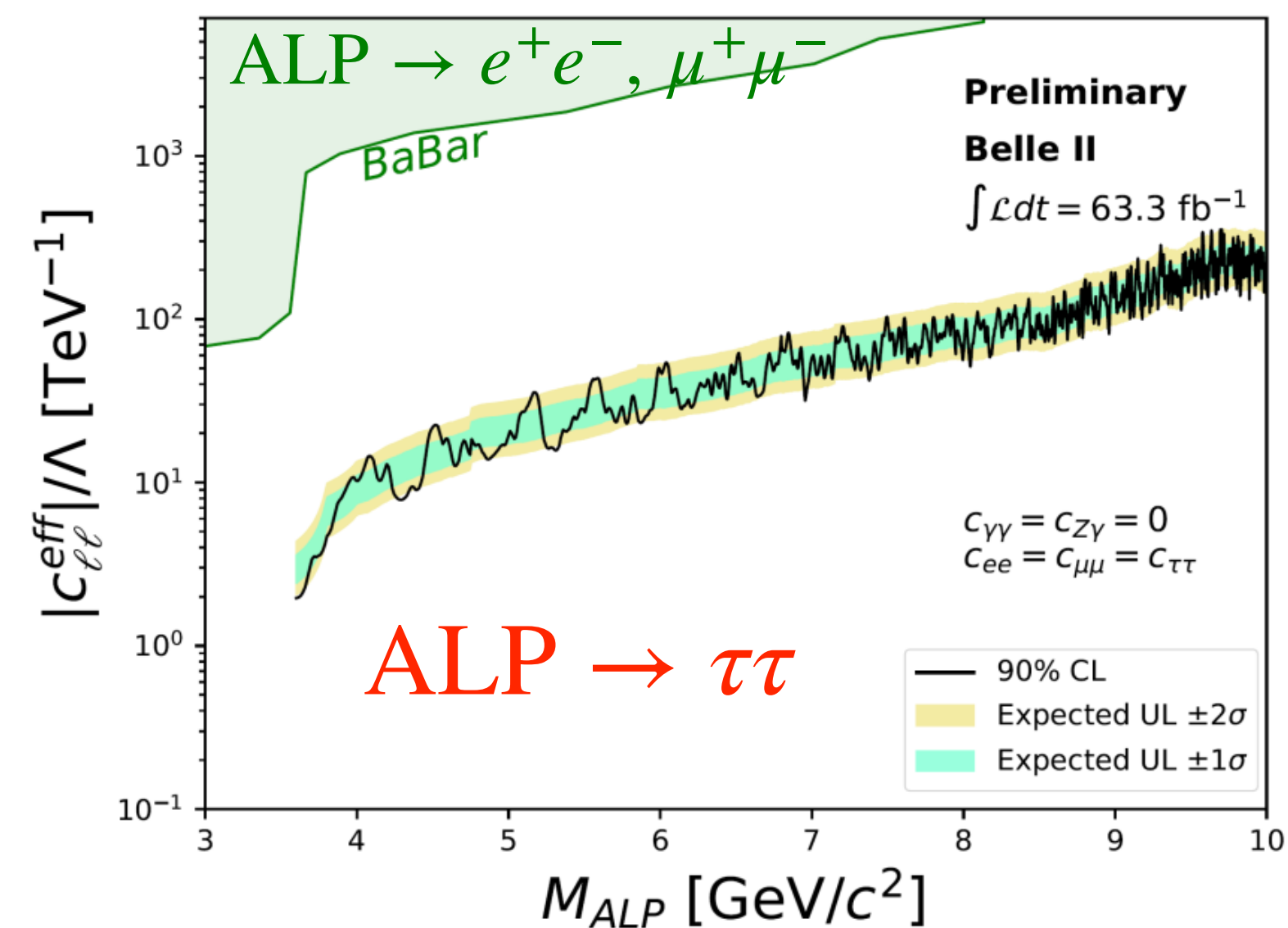
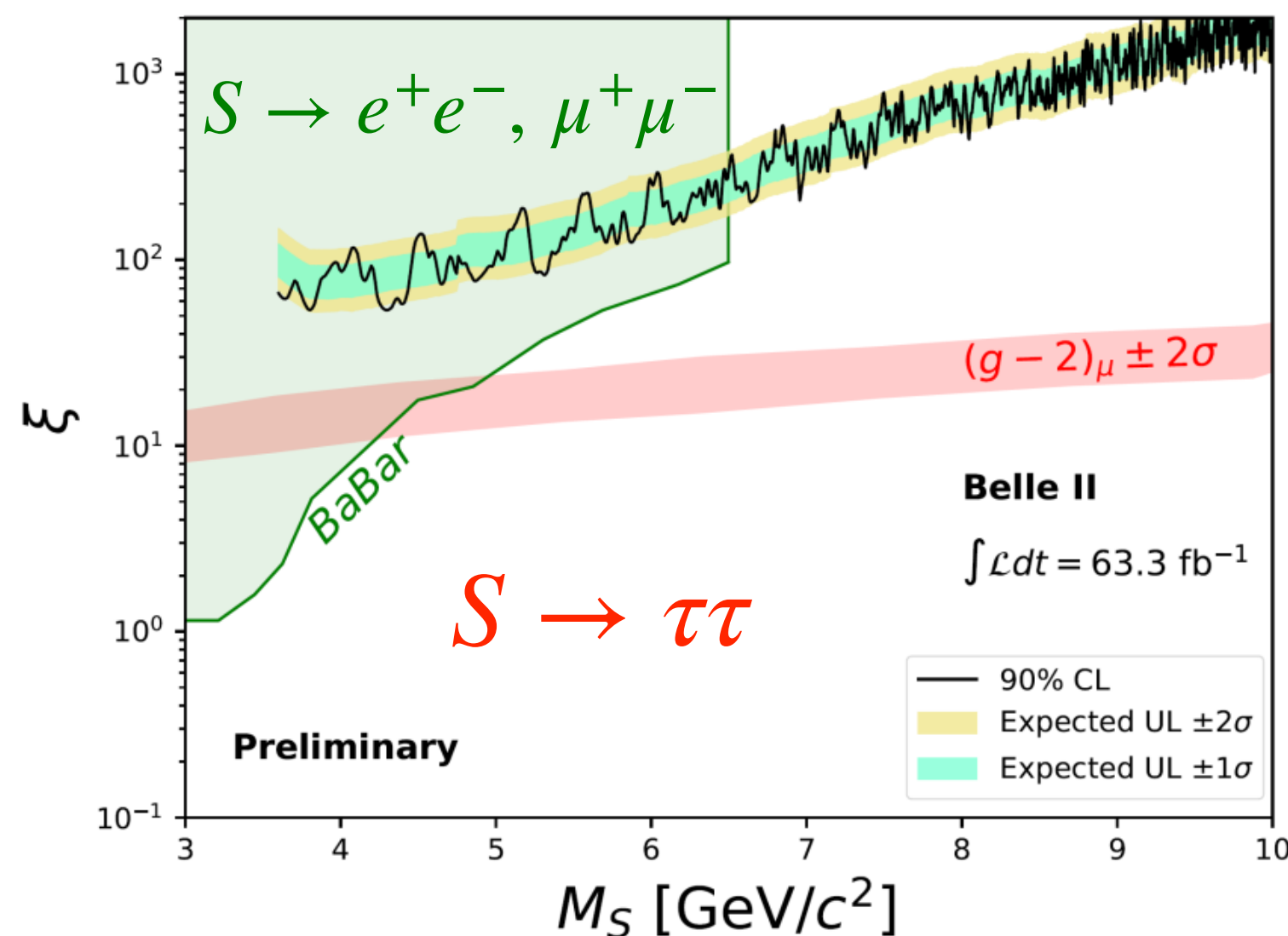
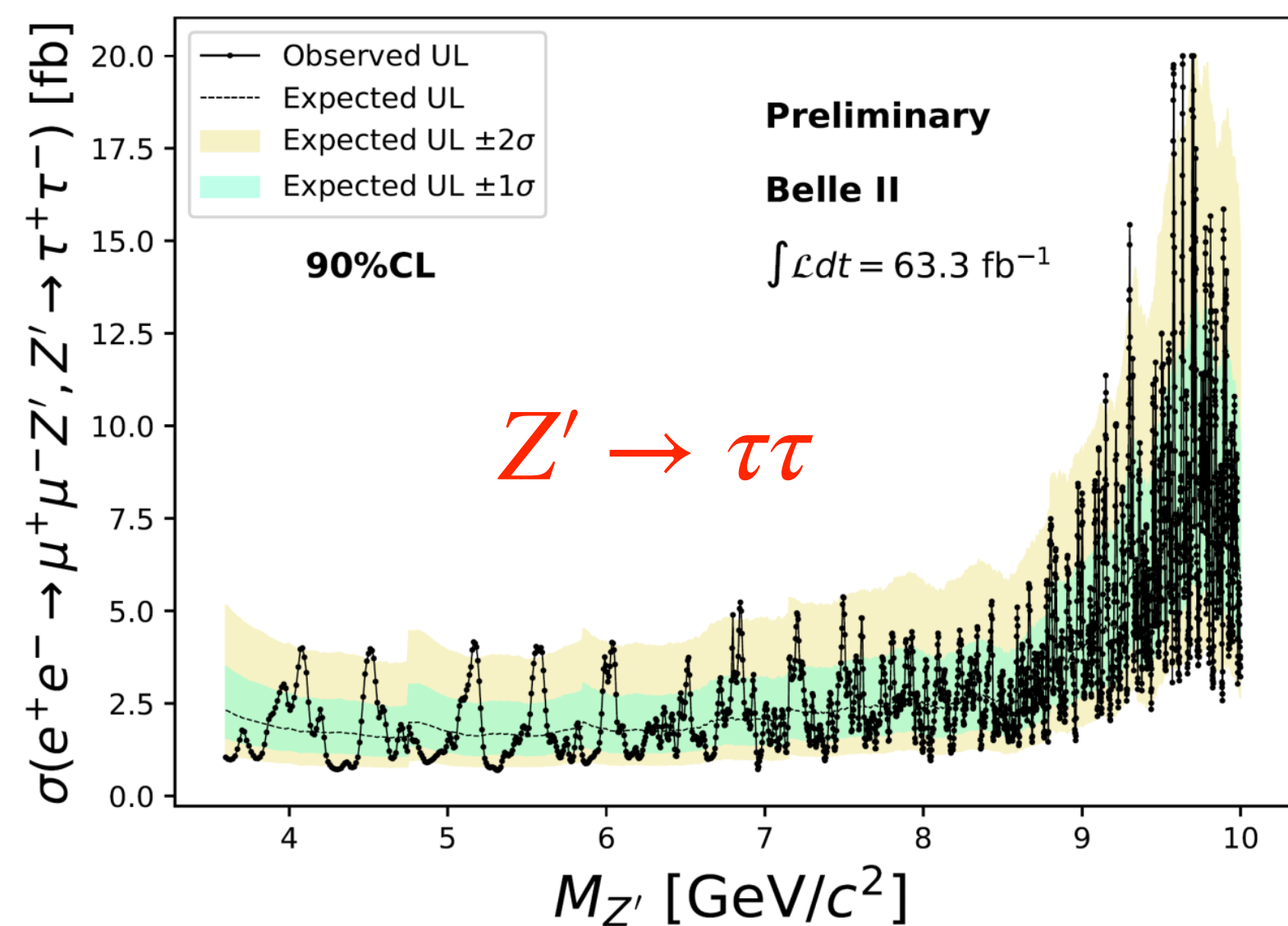
➔ $\tau\tau$ モードの探索は初。

- 2019-2020のデータセットを使用(63.3 fb^{-1})。
 - Recoil mass $M_{\text{recoil}}(\mu\mu)$ のスキャン。
 - τ : 1-prong decays: $2\mu + 2x e/\pi/\mu$ 。
 - トリガー: 3つ以上のトラック or single muon trigger (CDC-KLM)。
 - NNによるバックグラウンドの除去。
➔ コントロールサンプル: $\pi^+\pi^-\tau^+\tau^-$



$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-X, X \rightarrow \tau\tau$ 探索の結果

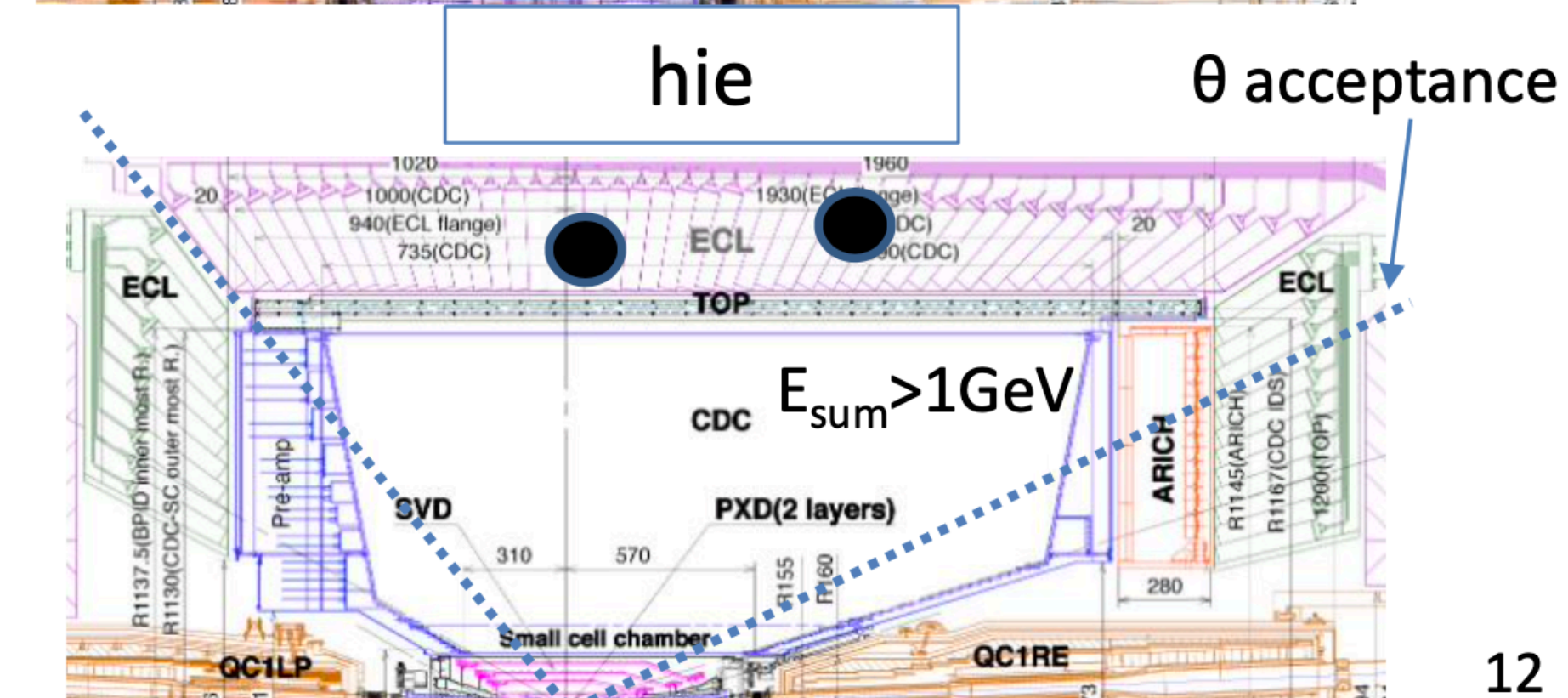
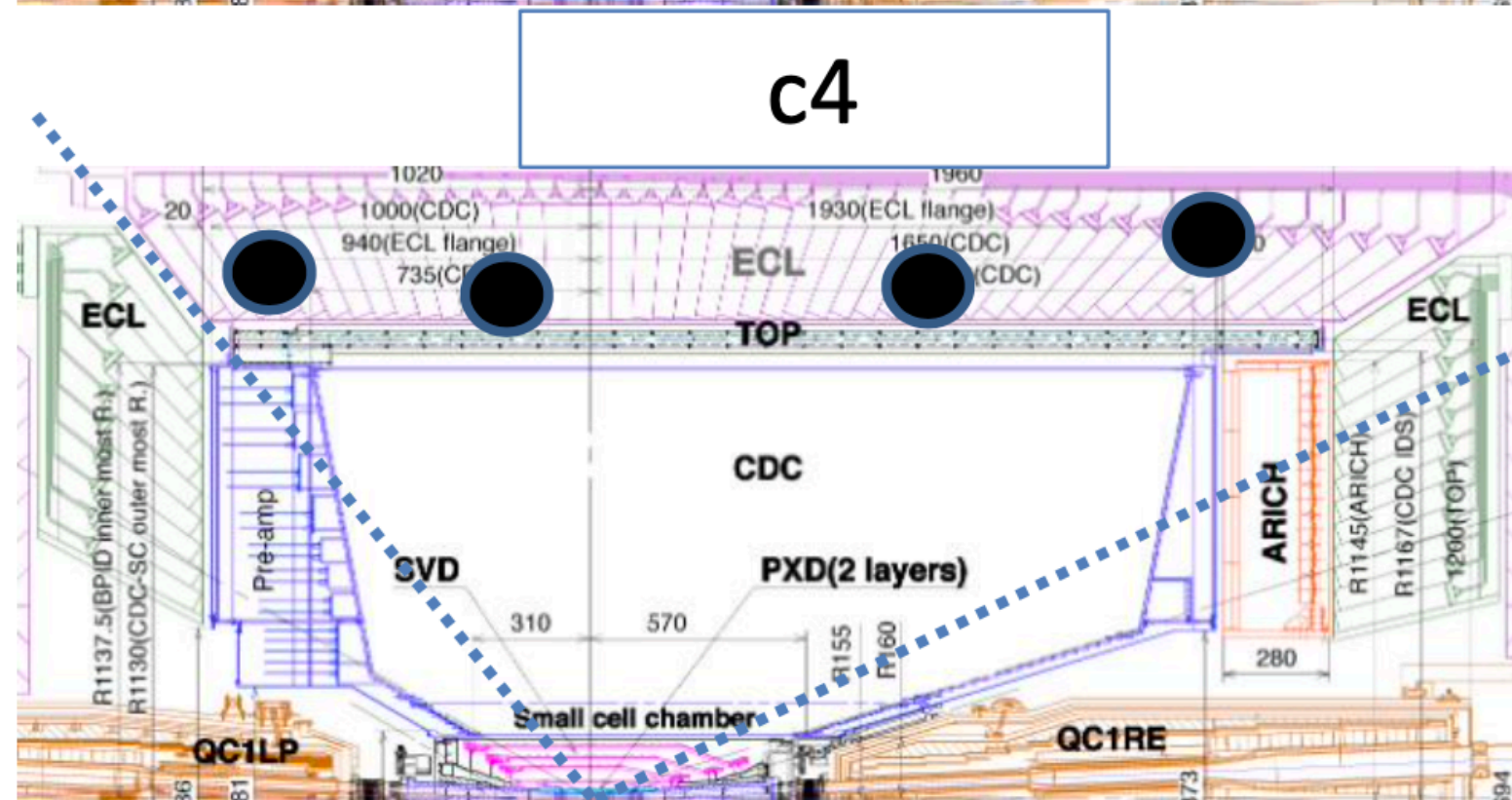
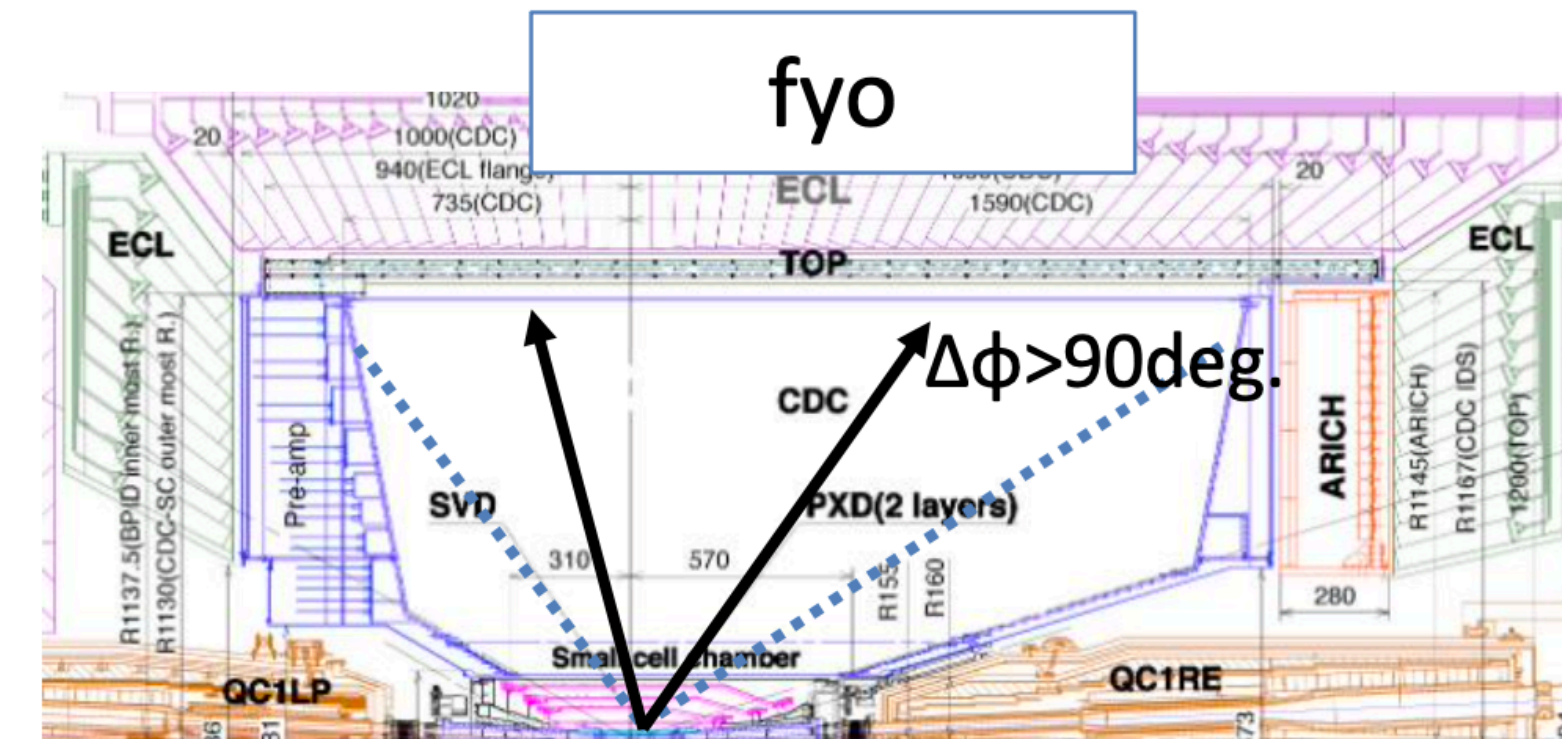
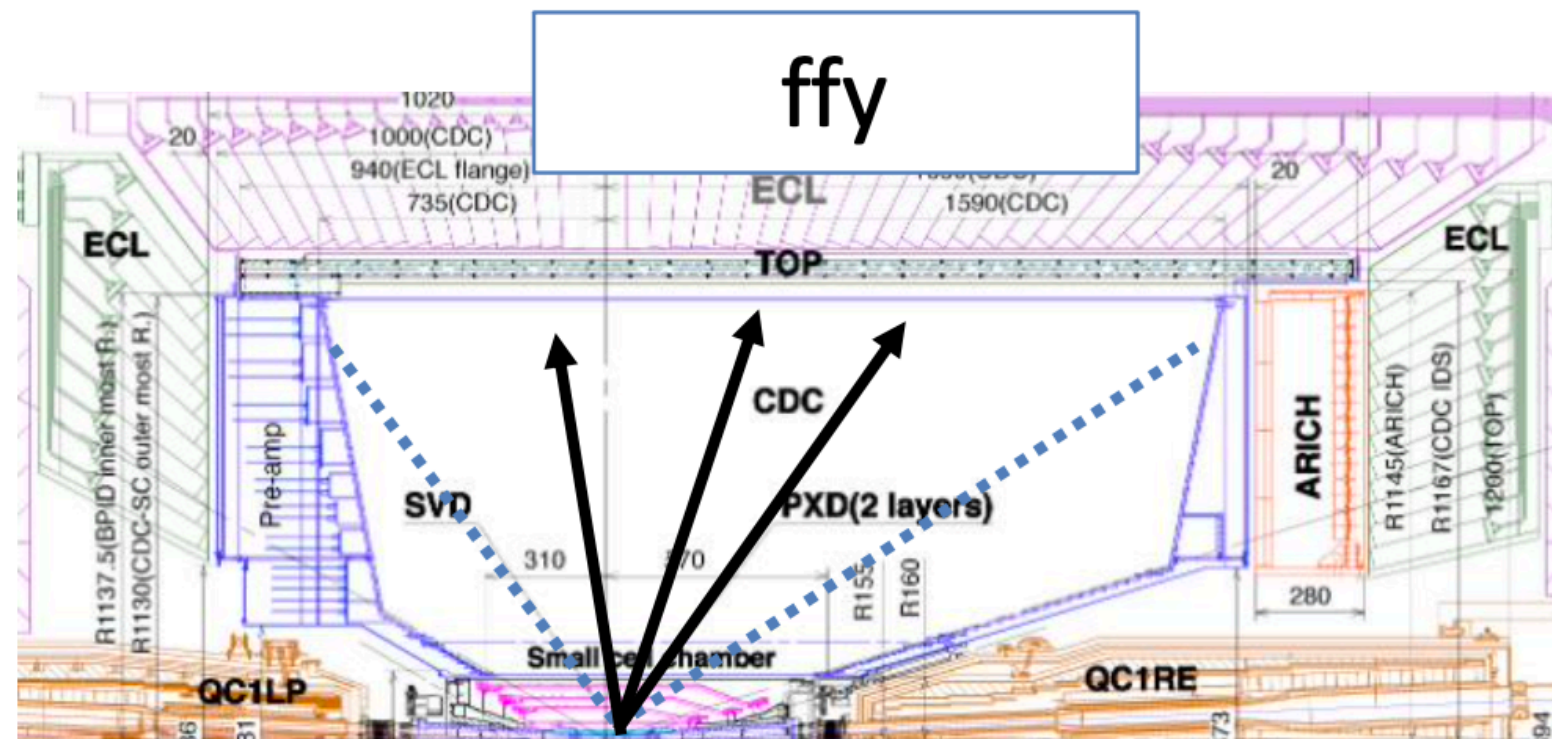
- これも有意な信号は見られなかった。
- 90%C.L.の上限値を反応断面積や定数につけた。
 - $M_S > 6.5 \text{ GeV}/c^2$ でのスカラーモデルに初の制限。
 - ALP $\rightarrow \tau\tau$ モードは初の探索結果。



トリガー

-Traditional condition same as Belle

Physics target	bit name	condition	Raw rate (kHz)	Exclusive rate (kHz)
BB pair	ffy	CDC #2track \geq 3, NNtrack \geq 1 with $ z < 20\text{cm}$ \geq 1	1.40	1.40
	fyo	CDC #2track \geq 2, NNtrack \geq 1 with $ z < 20\text{cm}$ \geq 1, $\Delta\phi > 90\text{deg}$	1.03	0.47
	c4	ECL #cluster \geq 4, $2 < \theta_{id} < 15$	0.13	0.08
	hie	ECL Energy sum $>$ 1GeV, $2 < \theta_{id} < 15$	0.69	0.56

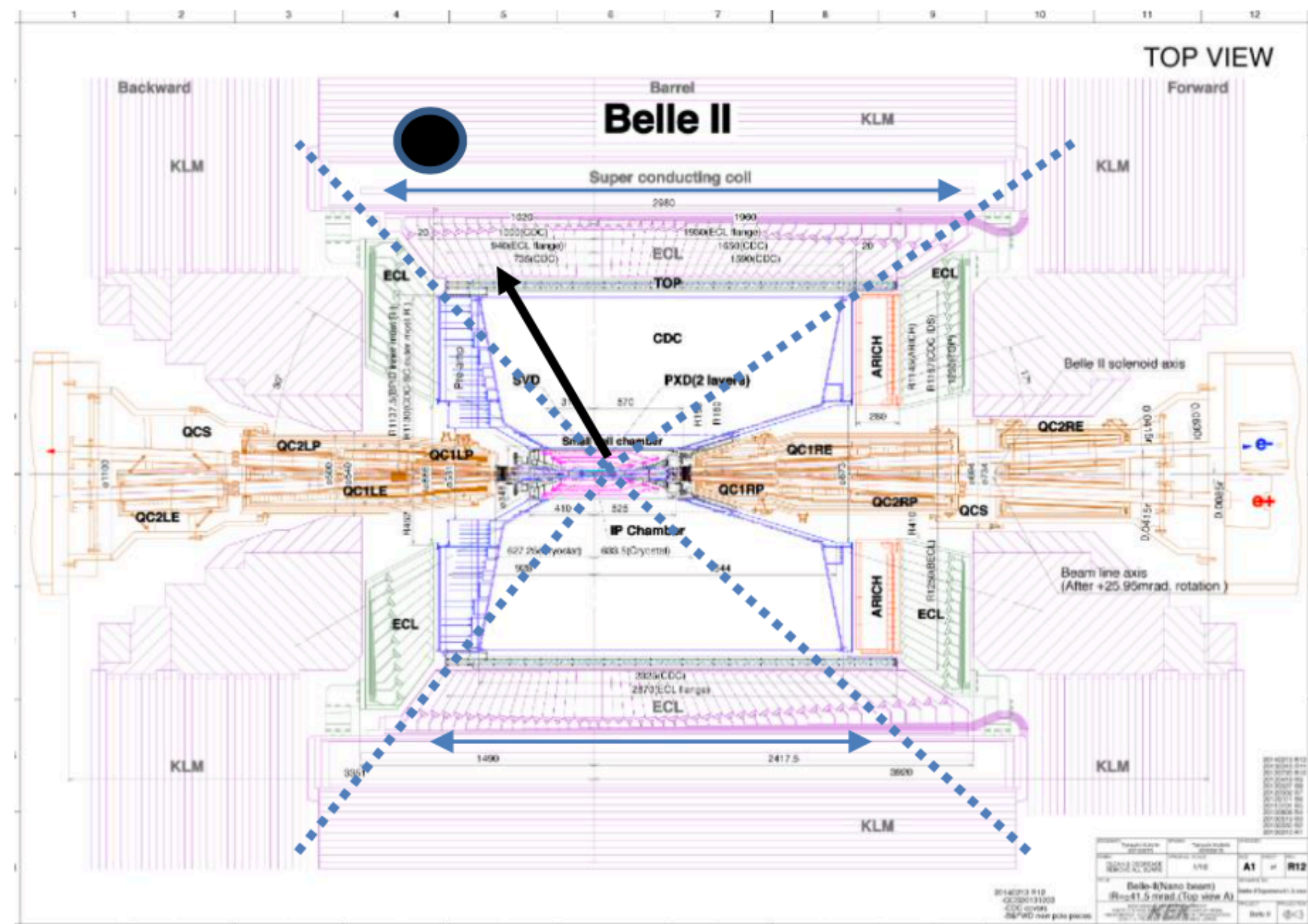


トリガー

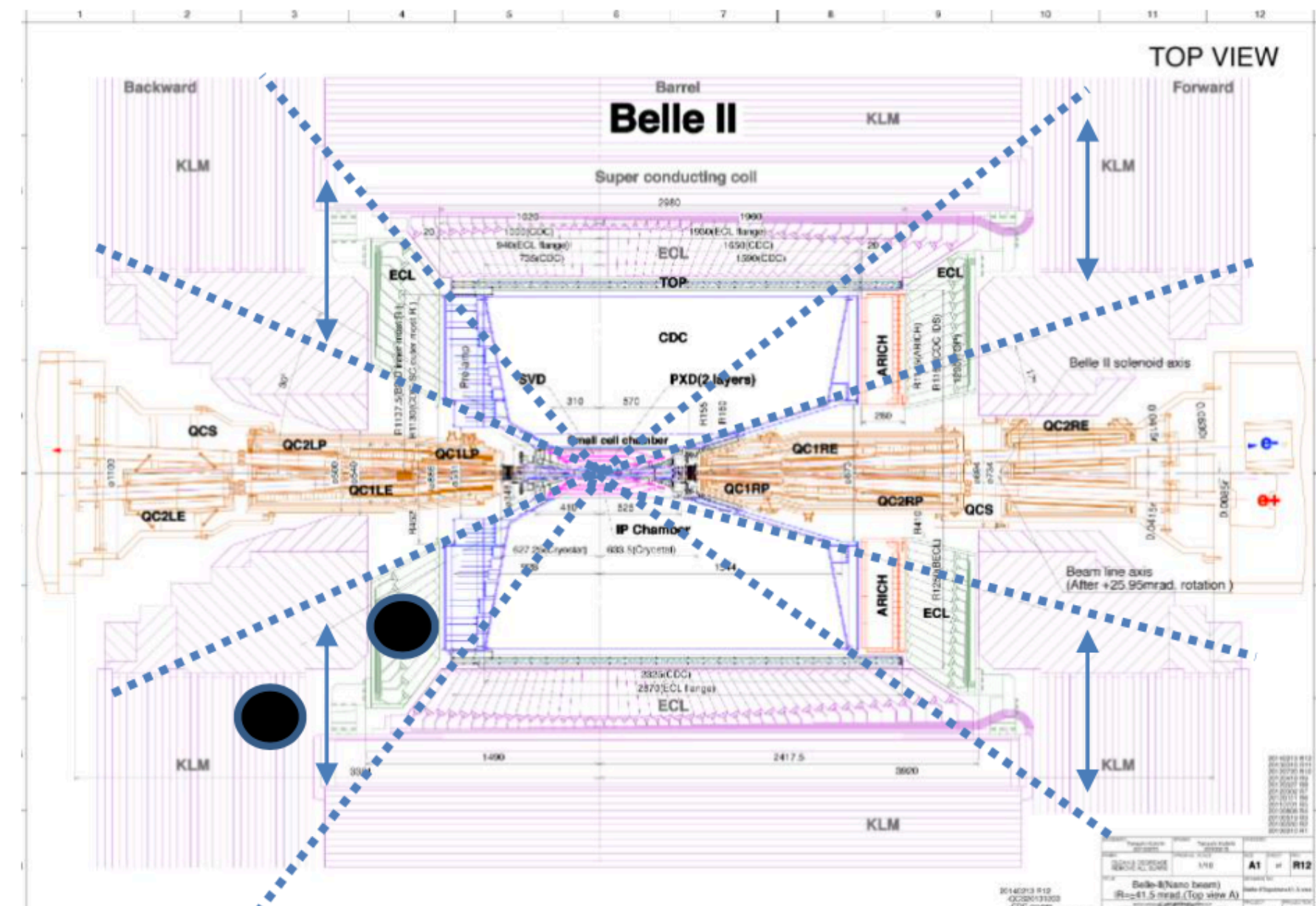
-CDC-KLM, ECL-KLM matching trigger

Physics target	bit name	condition	Raw rate (kHz)	Exclusive rate (kHz)
Single muon	cdcklm1-2	#CDC-BKLM matching \geq 1	0.27	0.15
	ecleklm1	#CDC-EKLM matching \geq 1	0.42	0.30

cdcklm1



ecleklm1

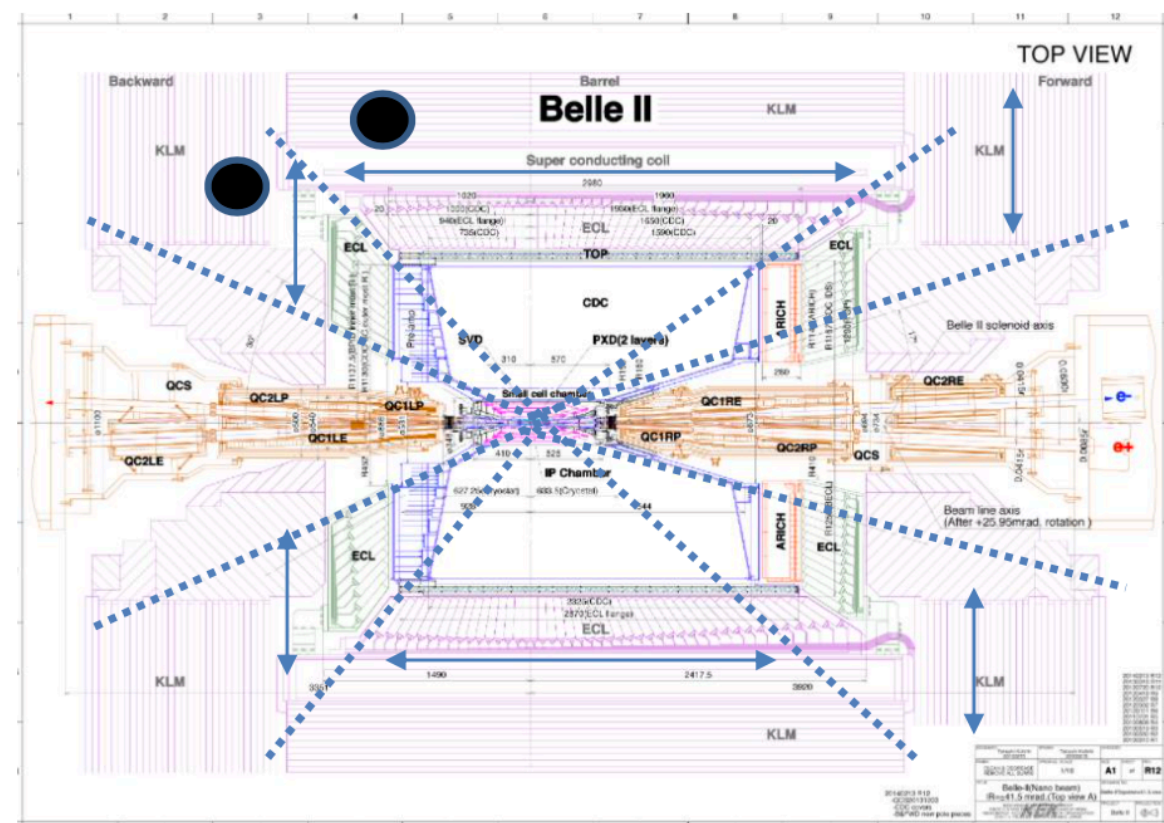


トリガー

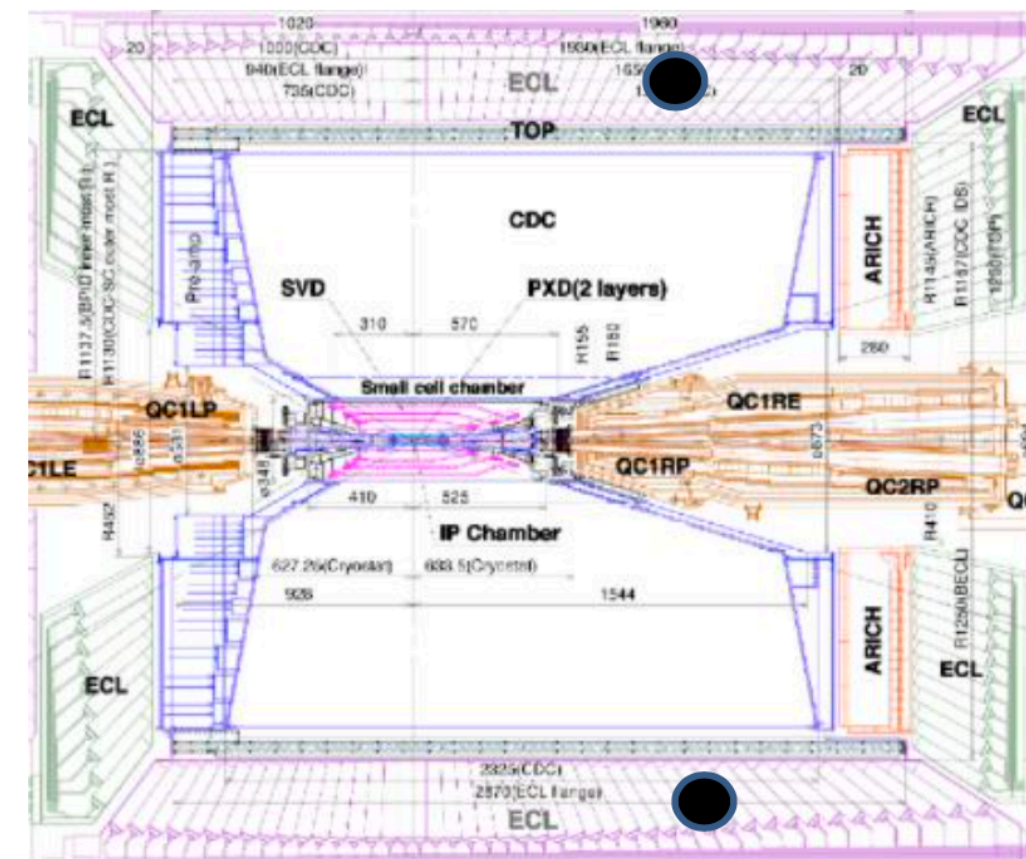
-KLM and ECL stand alone trigger

Physics target	bit name	condition	Raw rate (kHz)	Exclusive rate (kHz)
Muon pair	mu_b2b	#BKLM cluster \geq 2, $\Delta\phi > 90$ deg.	0.35	0.32
	eklm2	#EKLM cluster \geq 2	0.04	0.04
	beklm	#EKLM cluster=1, #BKLM cluster=1	0.20	0.18
	lml10	ECL $160 < \Delta\phi_{CM} < 200$ deg, $160 < \Sigma\theta_{CM} < 200$ deg, no 2GeV(CM) CL in an event	0.49	0.36
	eclmumu	ECL $160 < \Delta\phi_{CM} < 200$ deg, $165 < \Sigma\theta_{CM} < 190$ deg, $E < 2$ GeV	0.30	-

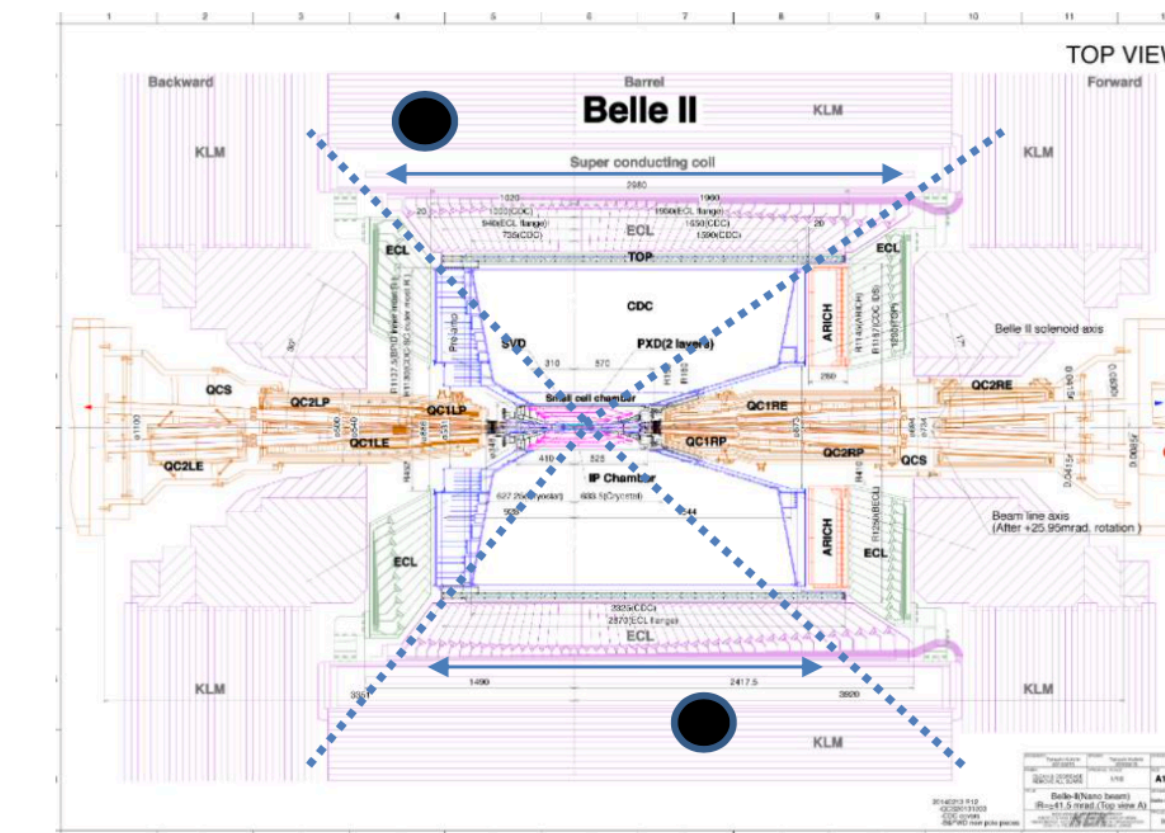
beklm



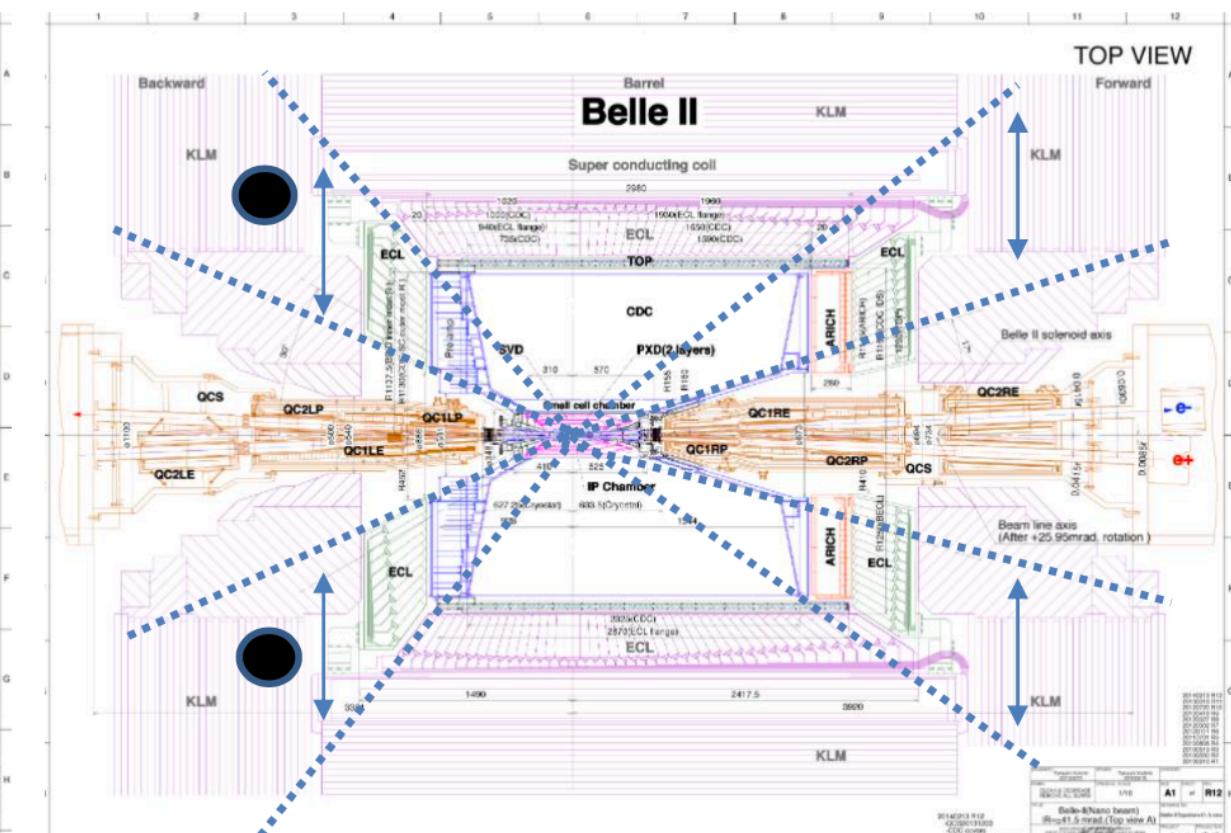
eclmumu



mu_b2b



eklm2

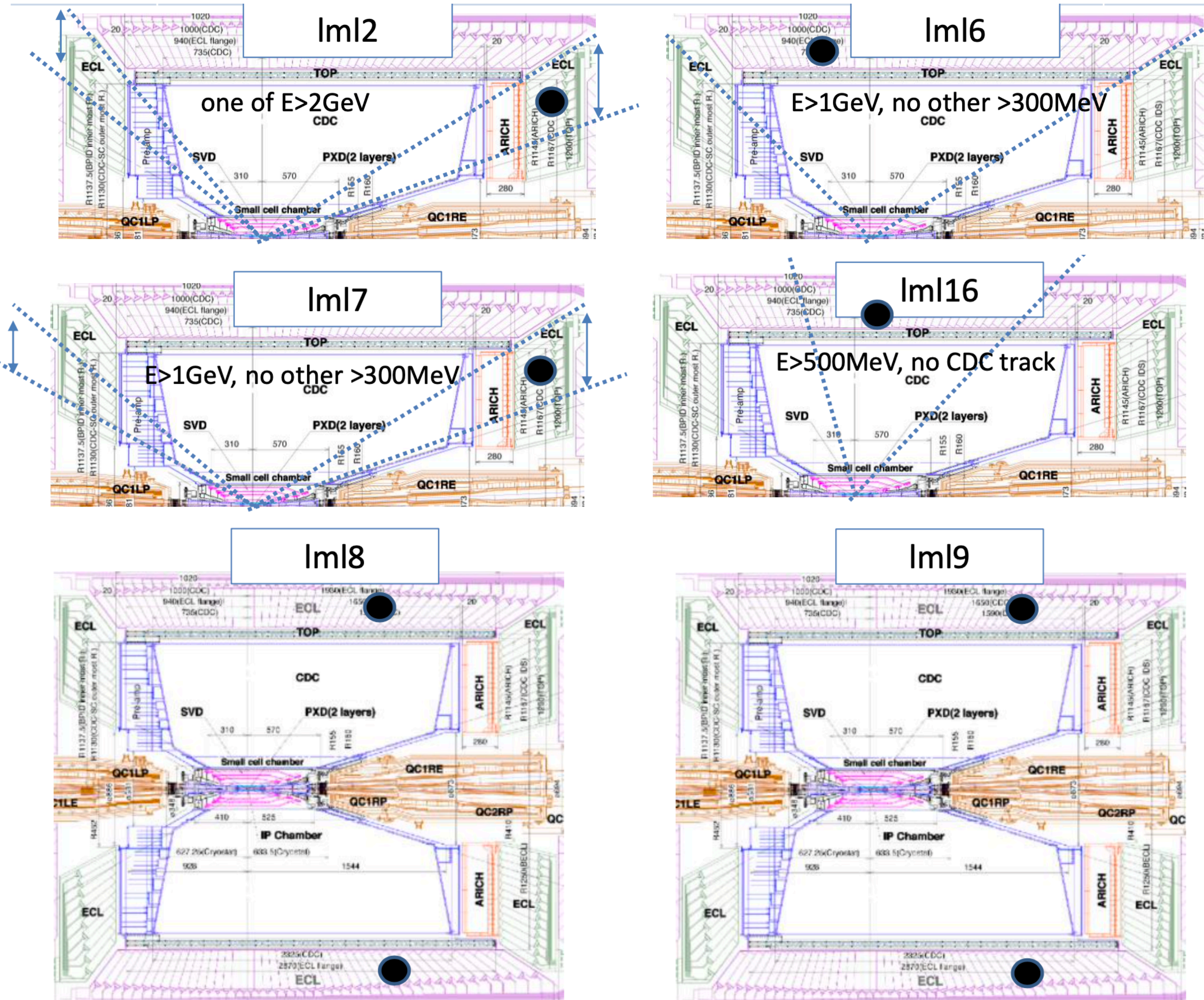


トリガー

-Mainly ECL based photon trigger

Physics target	bit name	condition	Raw rate (kHz)	Exclusive rate (kHz)
Z'	fy30	CDC #full track \geq 2, $\Delta\phi > 30\text{deg}$, # z $<$ 20cm \geq 1	1.59	0.14
ISR, π^0 FF	lml2	ECL one CL \geq 2 GeV(CM) with $\theta_{ID} = 2, 3, 15$ or 16	0.18	0.01
single γ	lml6	ECL only one CL \geq 1 GeV(CM) with $\theta_{ID} = 4 - 15$ and no other CL \geq 300 MeV(Lab) anywhere	0.18	0.03
single γ	lml7	ECL only one CL \geq 1 GeV(CM) with $\theta_{ID} = 2, 3,$ or 16 and no other CL \geq 300 MeV(Lab) anywhere	0.15	0.04
ALP	lml8	ECL $170^\circ < \Delta\phi_{CM} < 190^\circ$, both CL $>$ 250 MeV(Lab), no 2GeV(CM) CL in an event	0.08	0.05
ALP	lml9	ECL $170^\circ < \Delta\phi_{CM} < 190^\circ$, one CL $<$ 250 MeV(Lab), one CL $>$ 250 MeV(Lab), no 2GeV(CM) CL in an event	0.34	0.28
dark photon	lml16	ECL only one CL \geq 0.5 GeV(CM) with $\theta_{ID} = 6-11$ and no other CL \geq 300 MeV(Lab) anywhere, #CDC full track $==$ 0	0.32	0.23

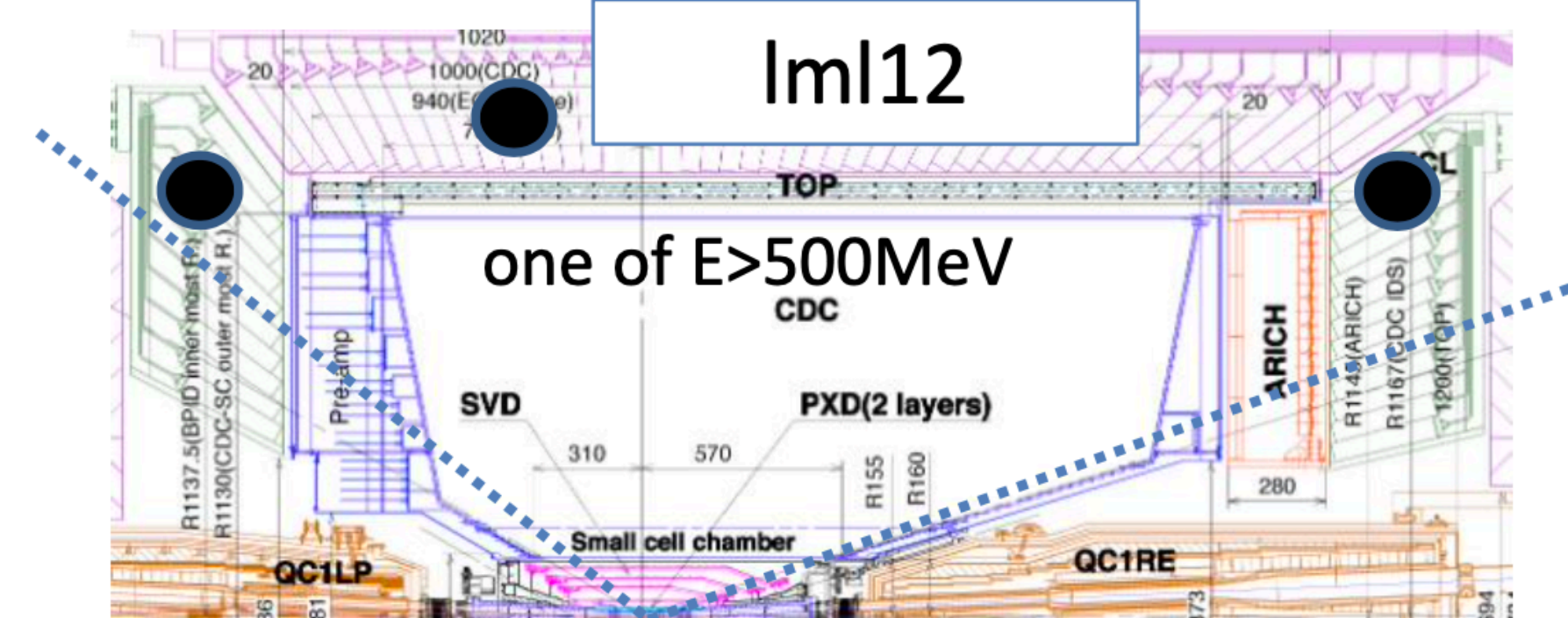
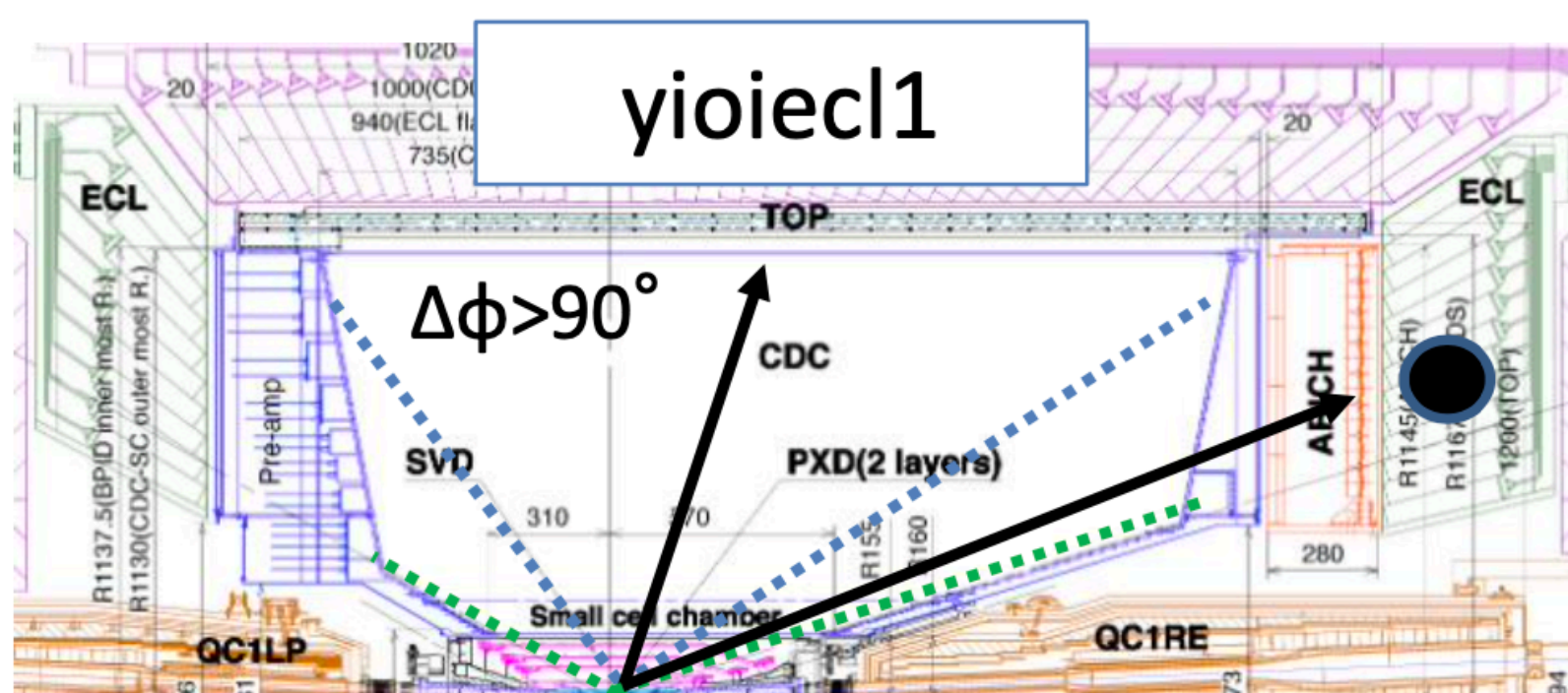
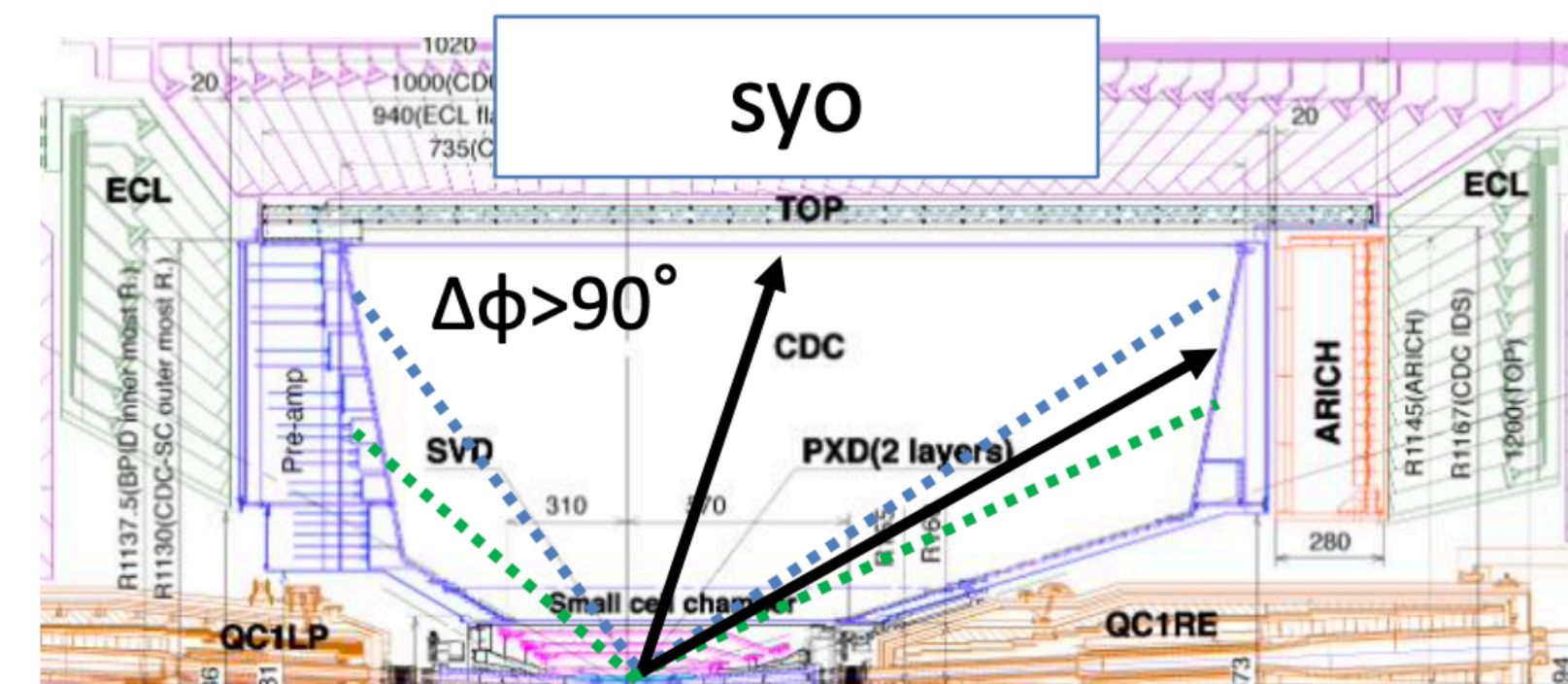
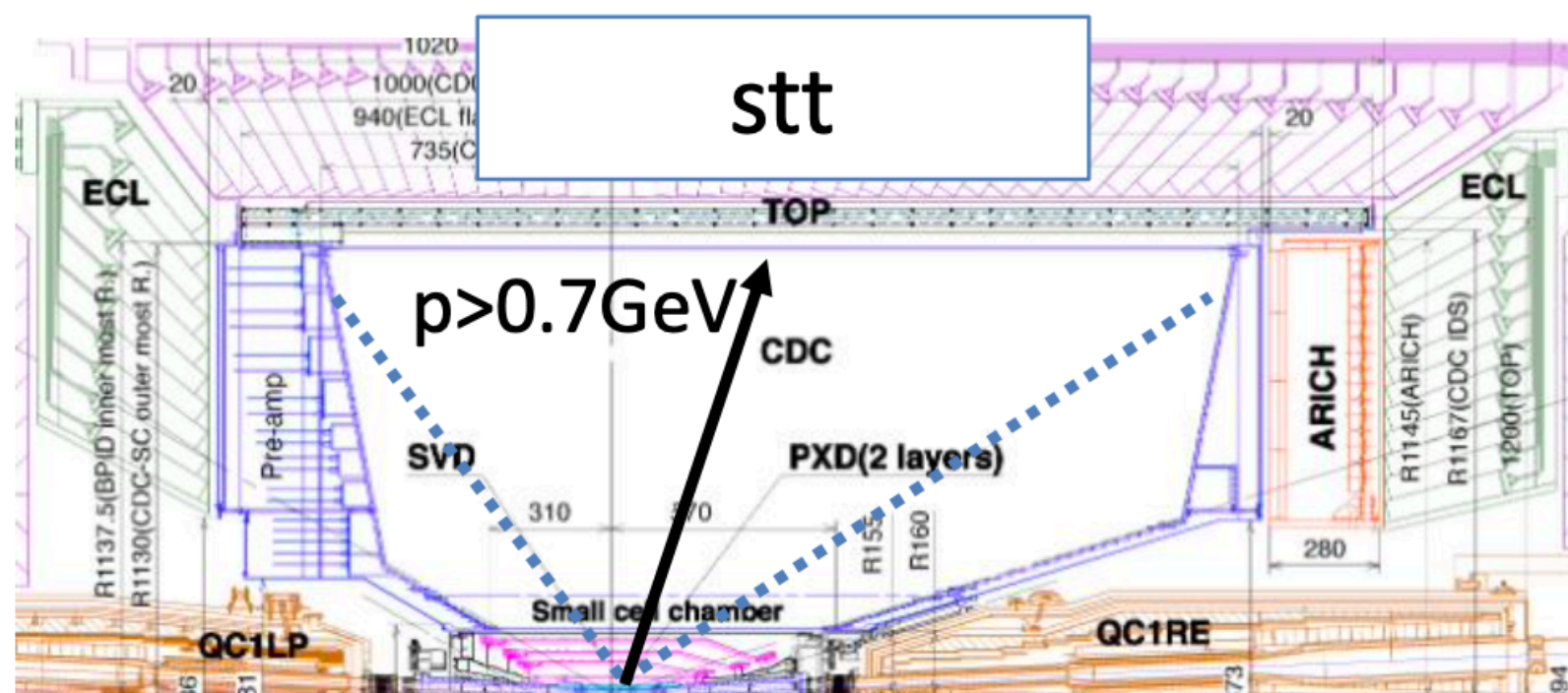
トリガー



トリガー

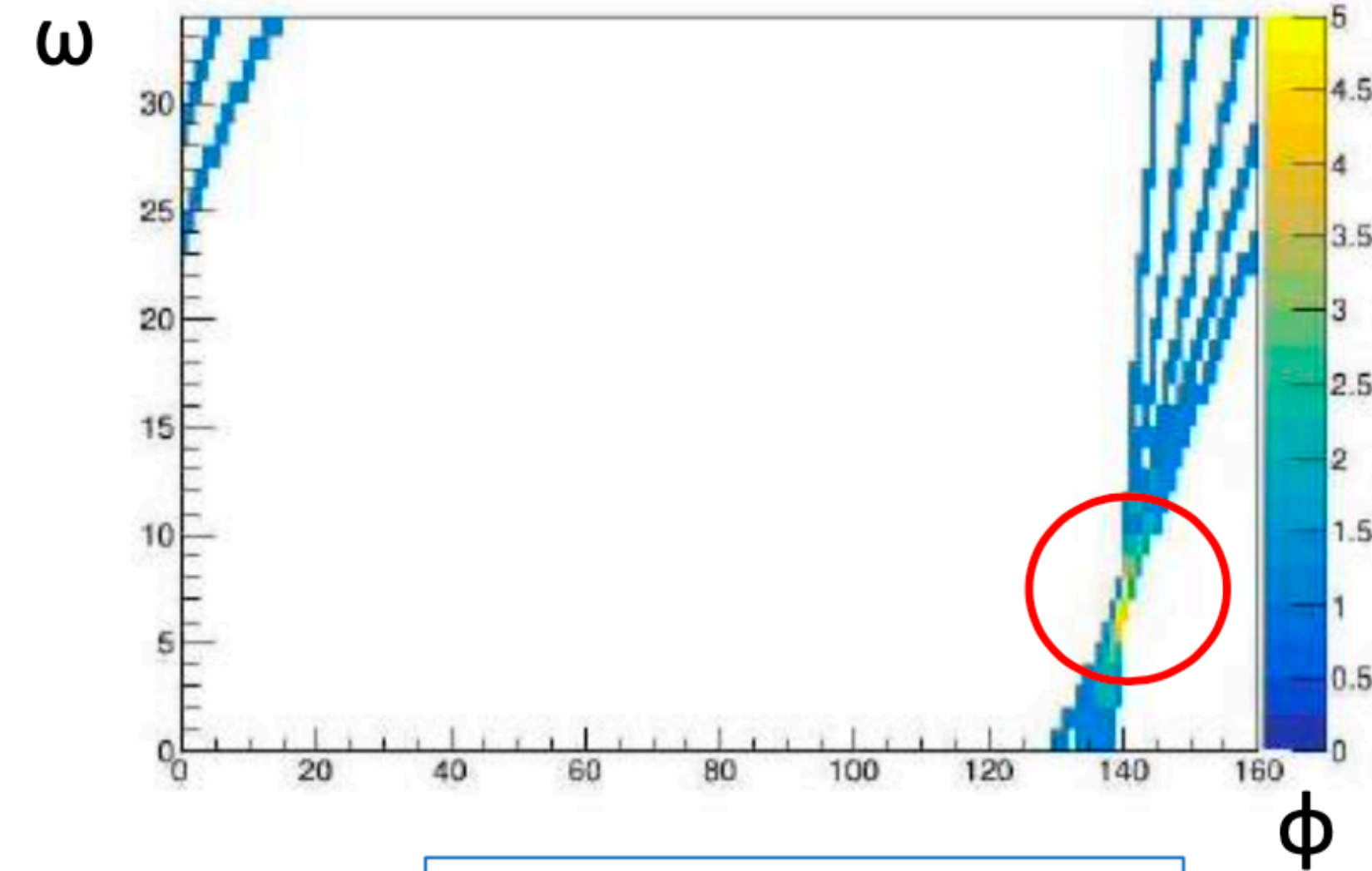
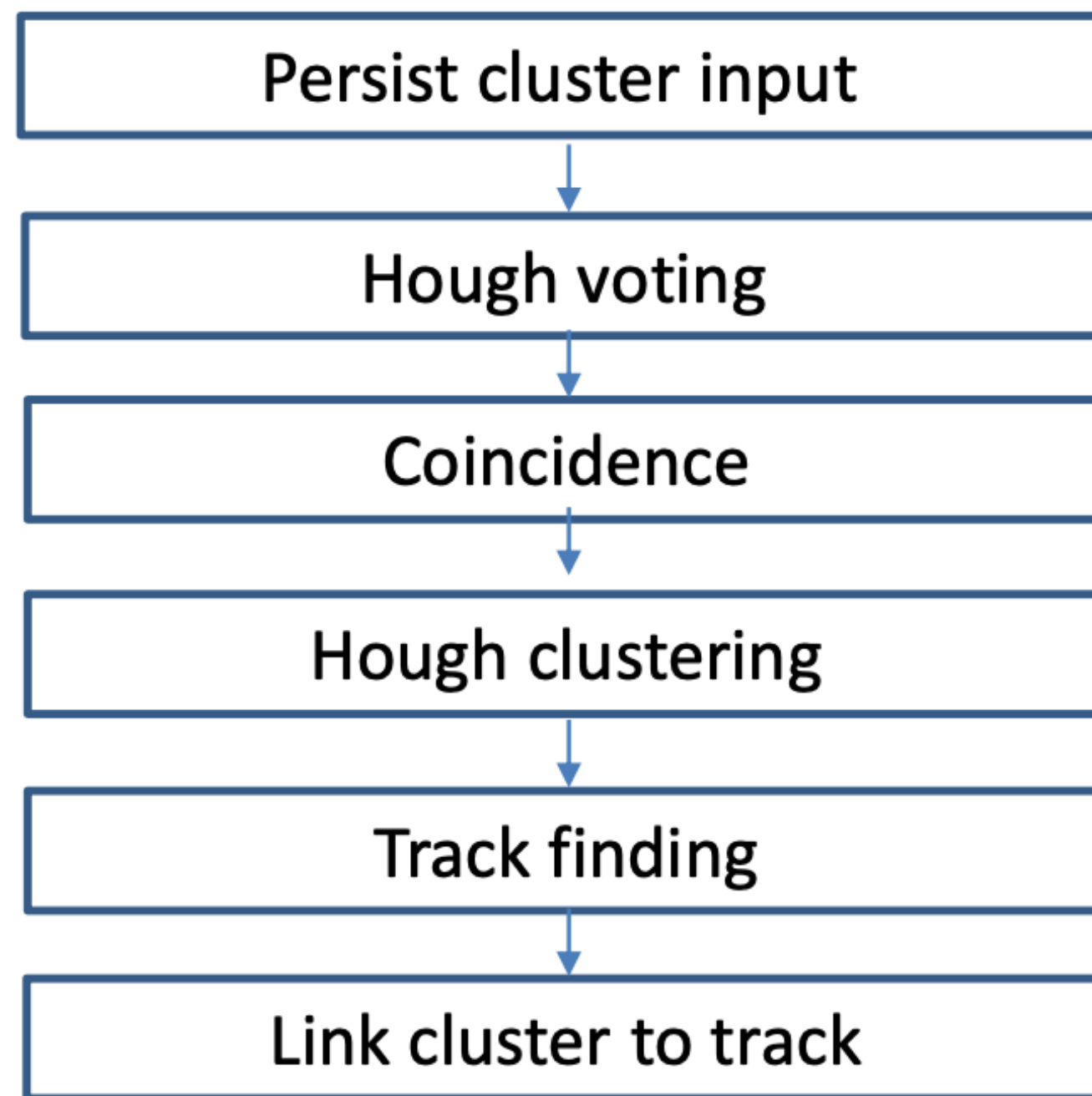
-CDC-KLM, ECL-KLM matching trigger

Physics target	bit name	condition	Raw rate (kHz)	Exclusive rate (kHz)
τ	stt	CDC #full track \geq 1, $ z < 15\text{cm}$, $p > 0.7\text{GeV}$	1.74	0.96
	syo	CDC #full track \geq 1, $ z < 15\text{cm}$, #short track \geq 1, $\Delta\phi > 90\text{deg}$.	0.74	0.38
	yioiecl1	CDC #full track \geq 1, $ z < 15\text{cm}$, #inner track \geq 1, $\Delta\phi > 90\text{deg}$.	0.37	0.08
	lml12	NCL \geq 3, at least 1 CL \geq 500 MeV(Lab)) (with $\theta_{ID} = 2 - 16$)	0.17	0.03

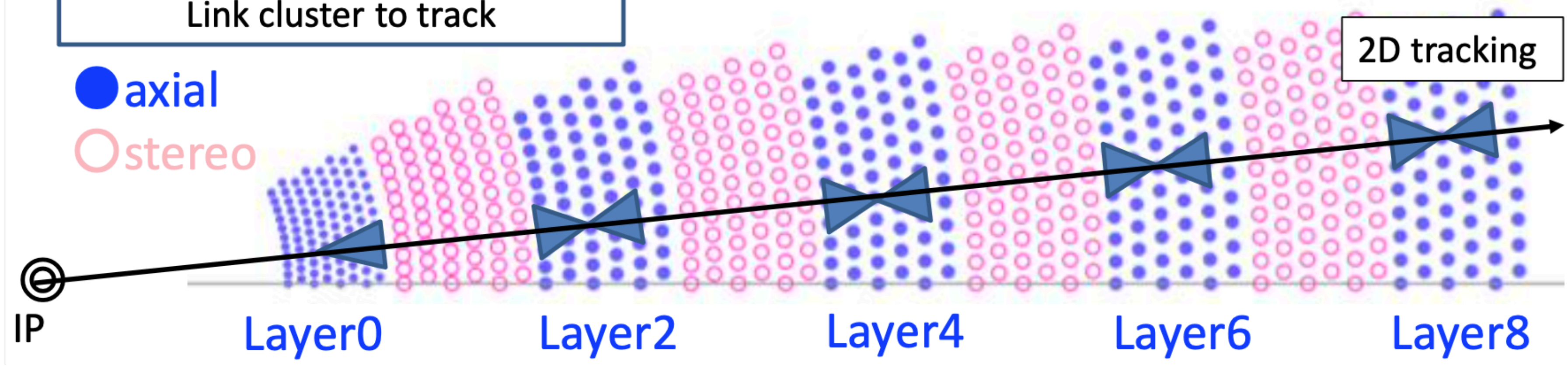


CDC trigger: 2D tracking

- axial layerのクラスターの中心位置(x,y)を(ω, ϕ)平面にハフ変換
- 飛跡をIPを通る円と仮定 複数のクラスターを通る円を探す

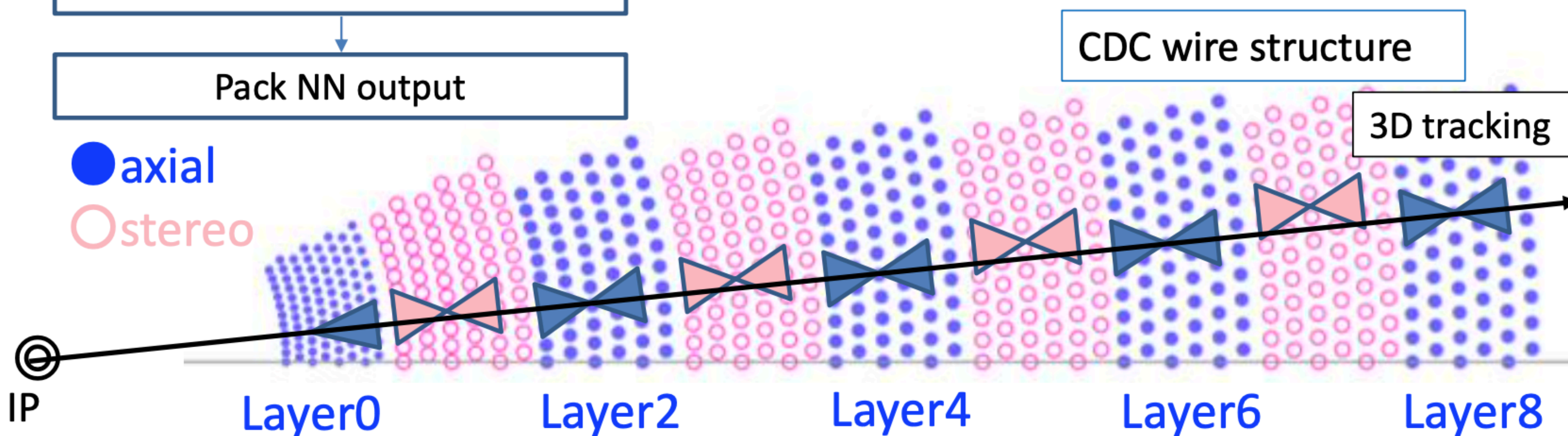
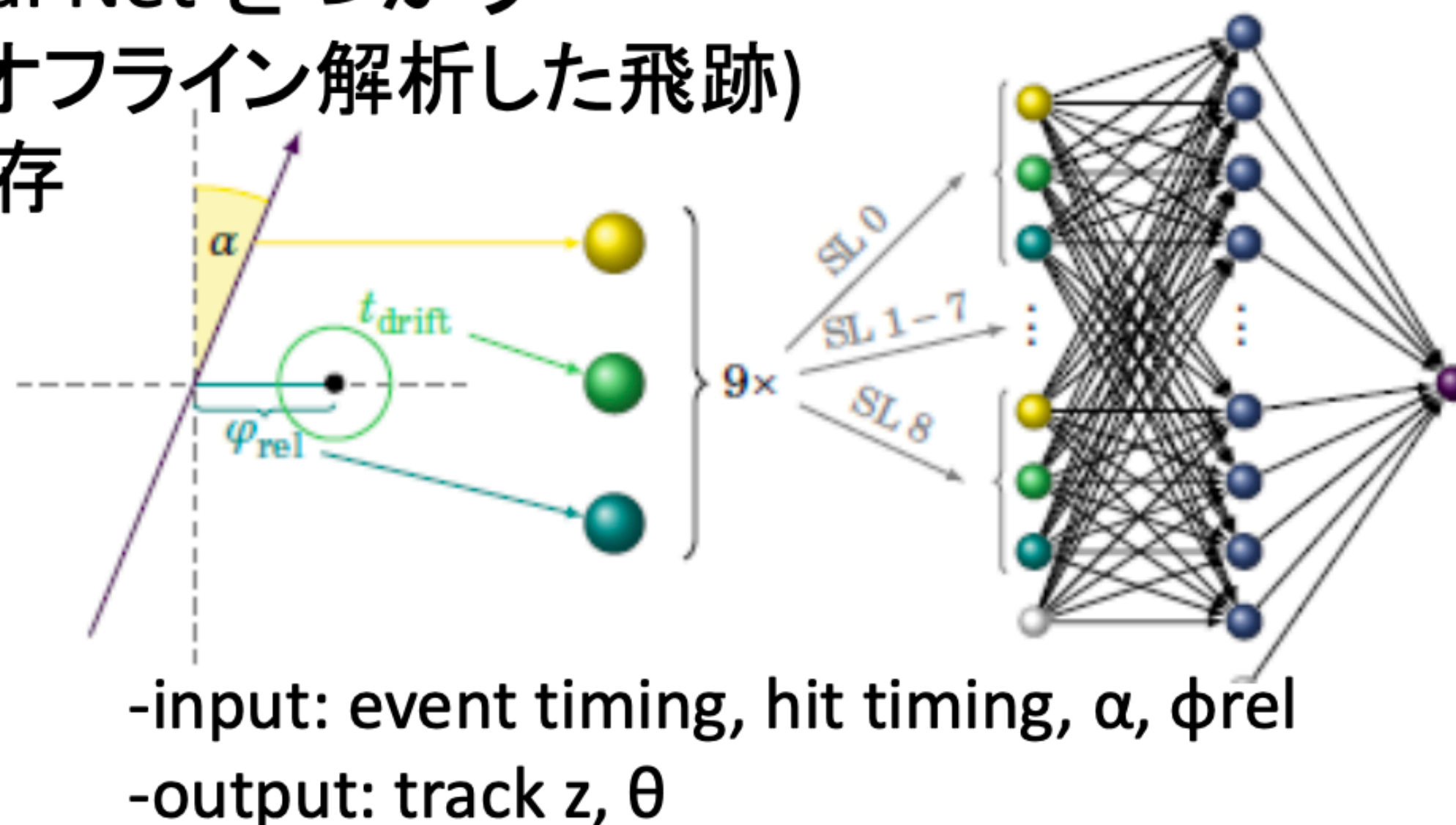
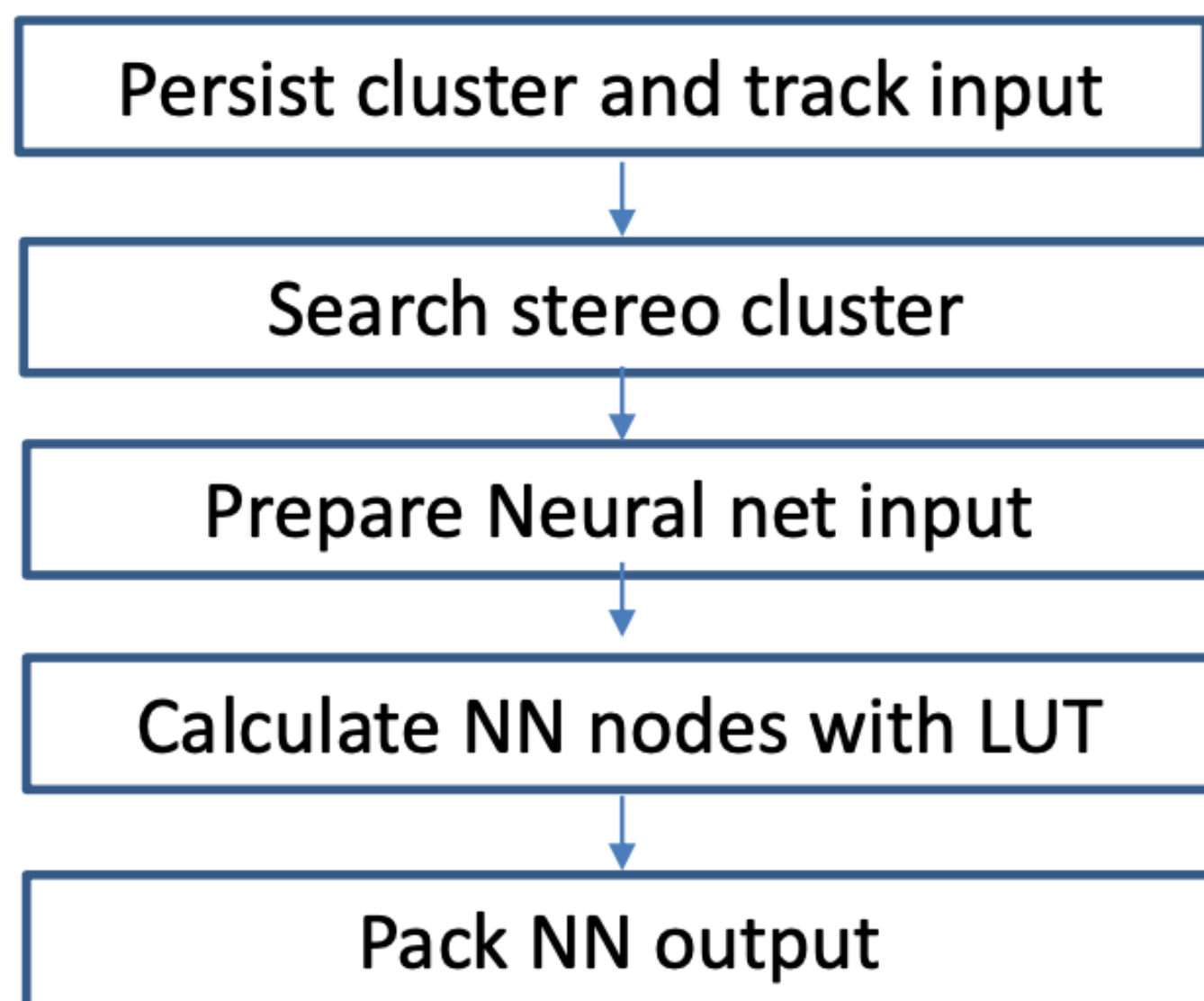


CDC wire structure



CDC trigger: 3D tracking

- 2Dtrackに使われたクラスターと、stereo layerのクラスターを合わせて3次元飛跡再構成する Neural Net をつかう
- 学習はオフラインで行う(教師=オフライン解析した飛跡)
- 学習結果をLUTとしてFPGAに保存

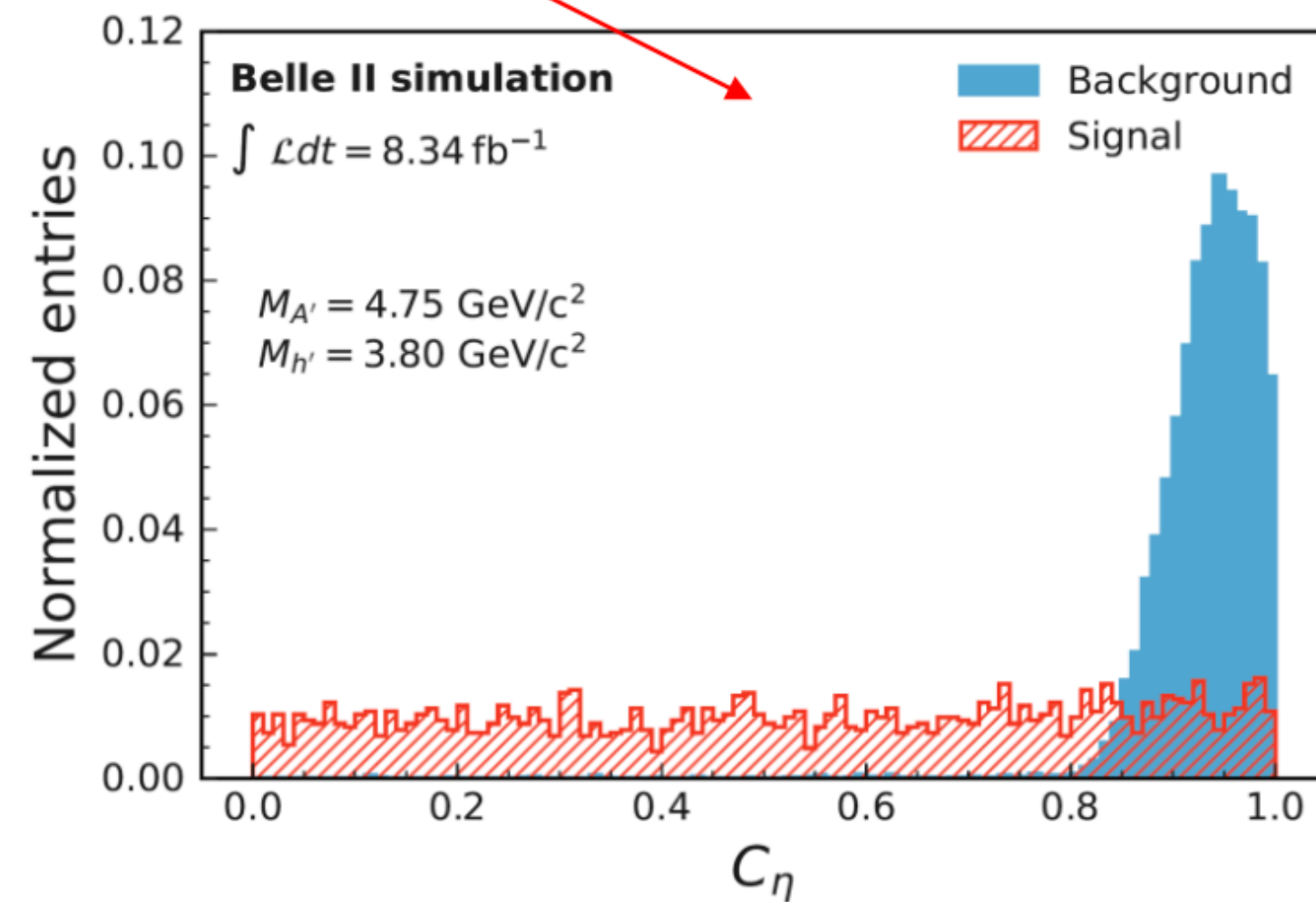
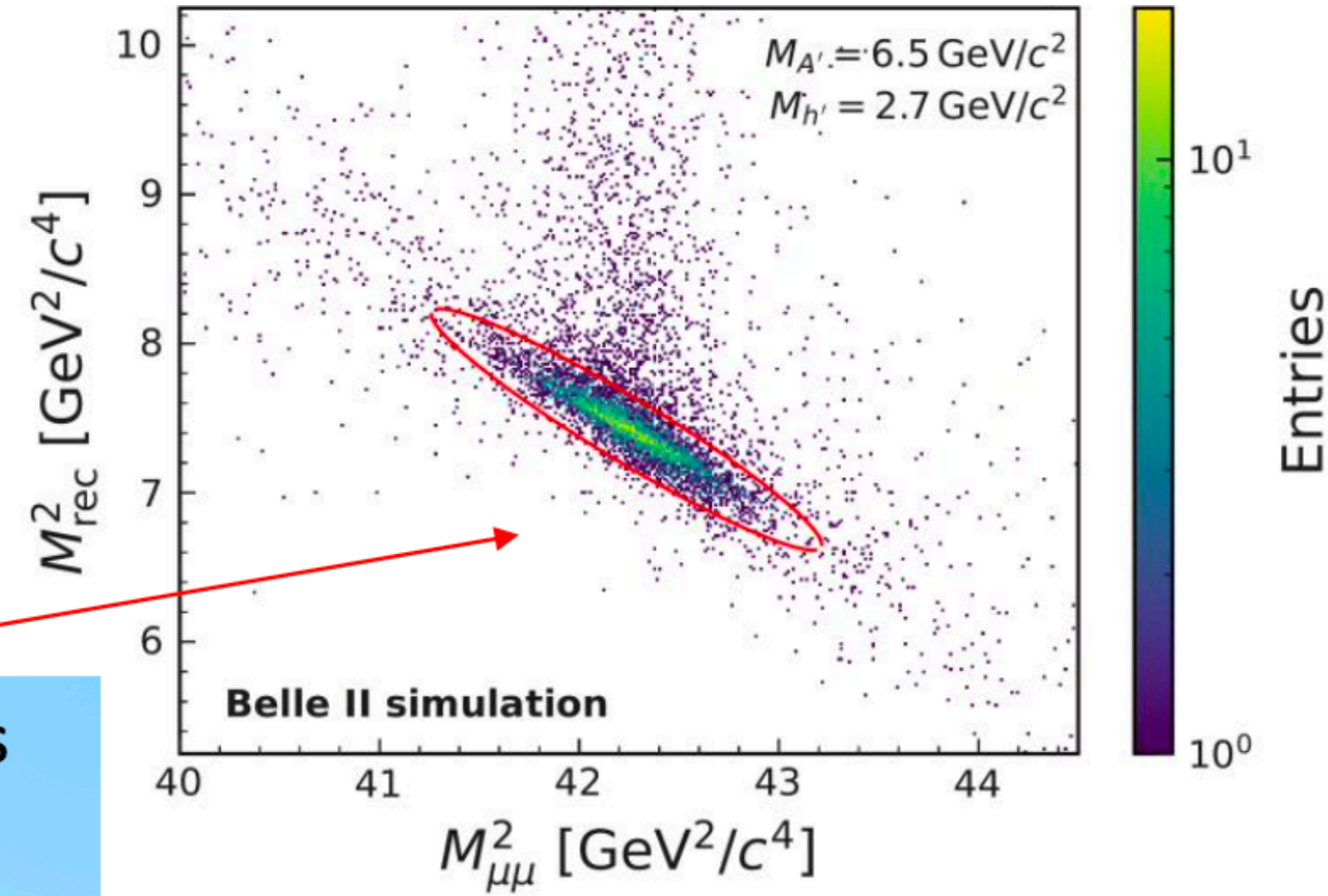


Dark Higgsstrahlung

Two-track trigger
 Two muons, $p_T^{\mu\mu} > 0.1 \text{ GeV}/c$
 Recoil points to barrel ECL
 No extraenergy
 Scan M_{recoil} vs $M_{\mu\mu}$

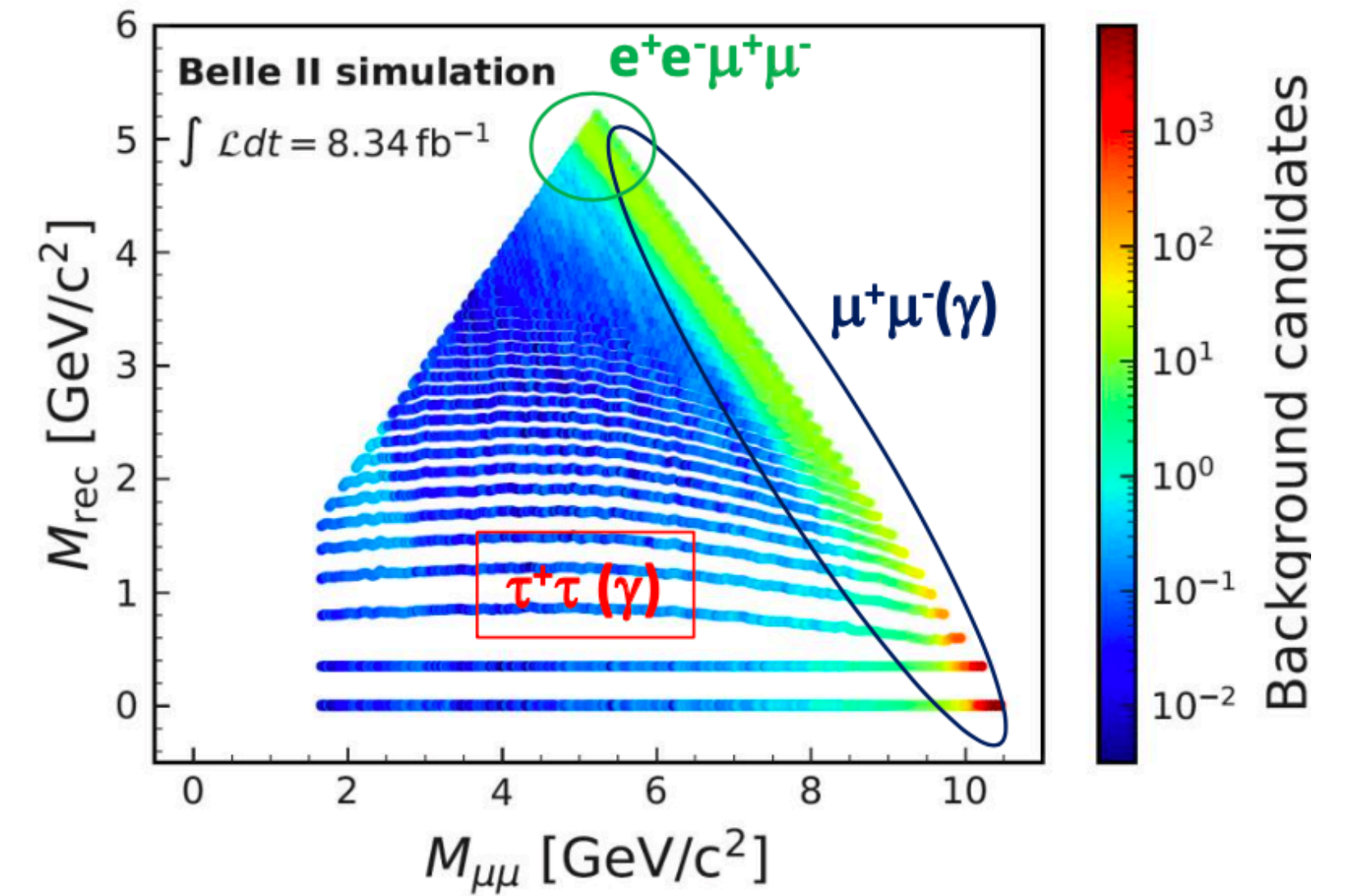
~9000 overlapping elliptical mass windows

Helicity angle

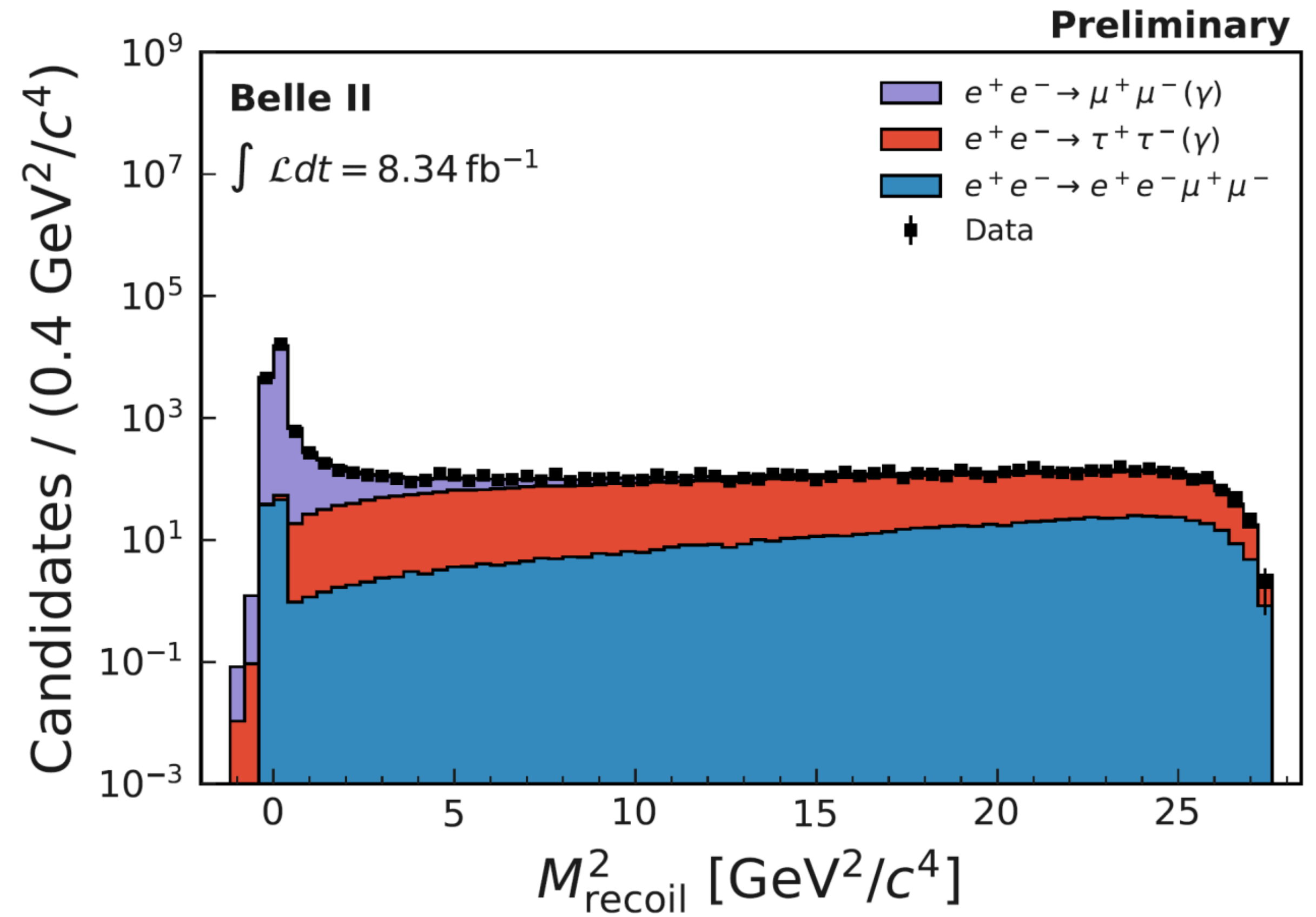
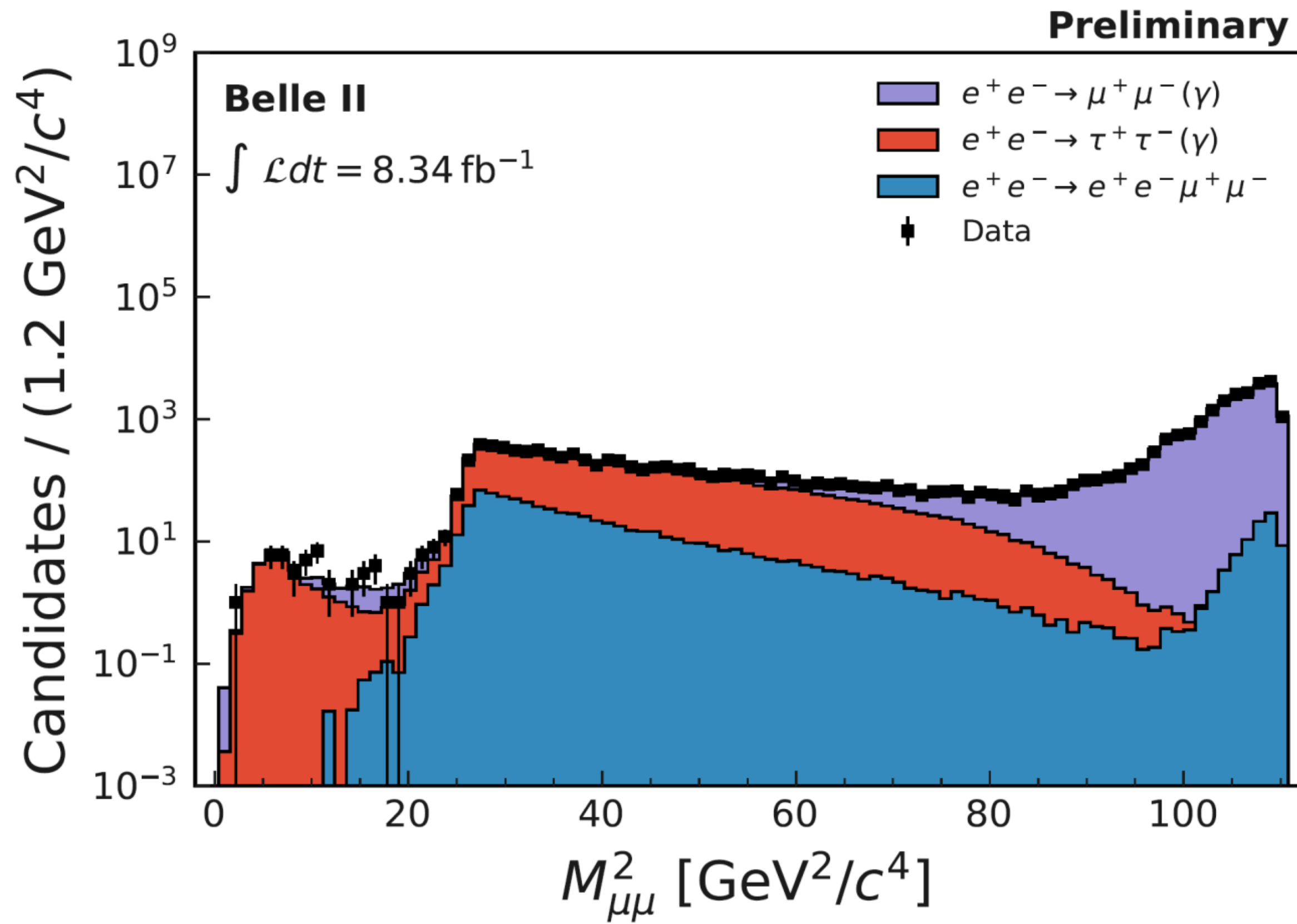


Backgrounds

$\mu^+\mu^-(\gamma)$ 79%
 $\tau^+\tau^-(\gamma)$ 18%
 $e^+e^-\mu^+\mu^-$ 3%



Dark Higgsstrahlung



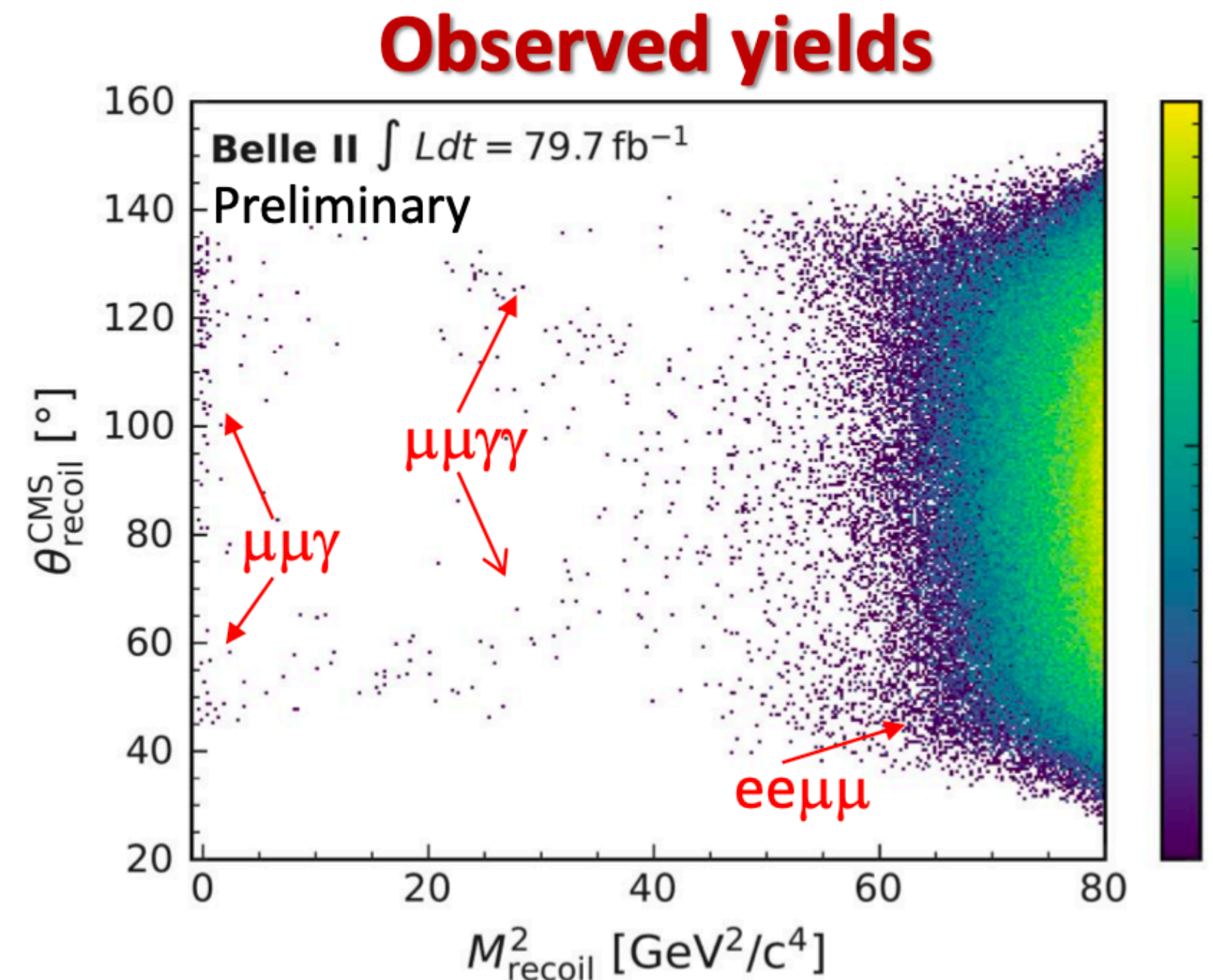
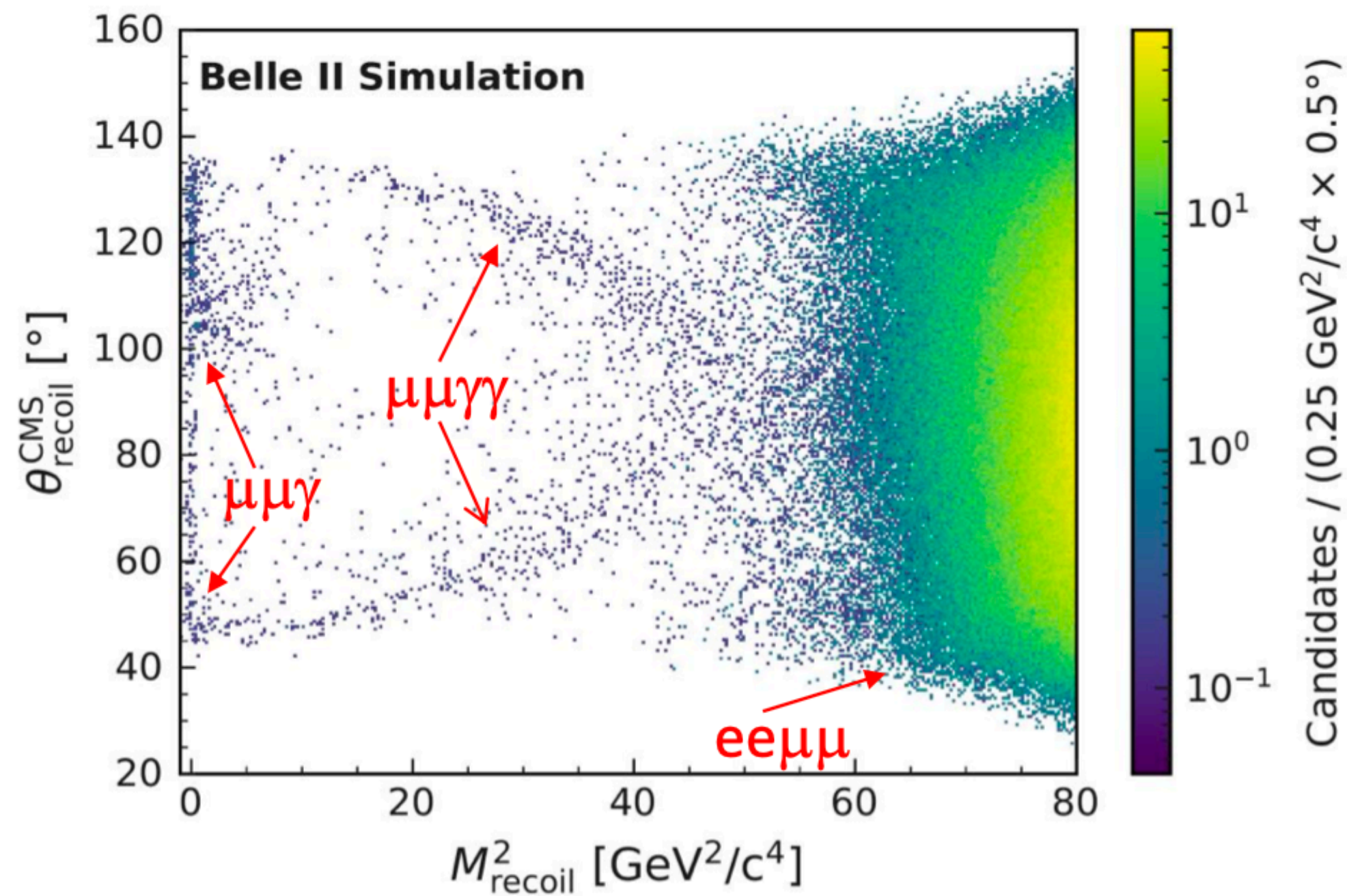
Z' \rightarrow Invisible

- $\tau^+\tau^- (\gamma)$ almost 100% suppressed
- $\mu^+\mu^- (\gamma)$ dominates up to $\sim 7 \text{ GeV}/c^2$
- $e^+e^- \mu^+\mu^-$ dominates for high masses

3 control samples

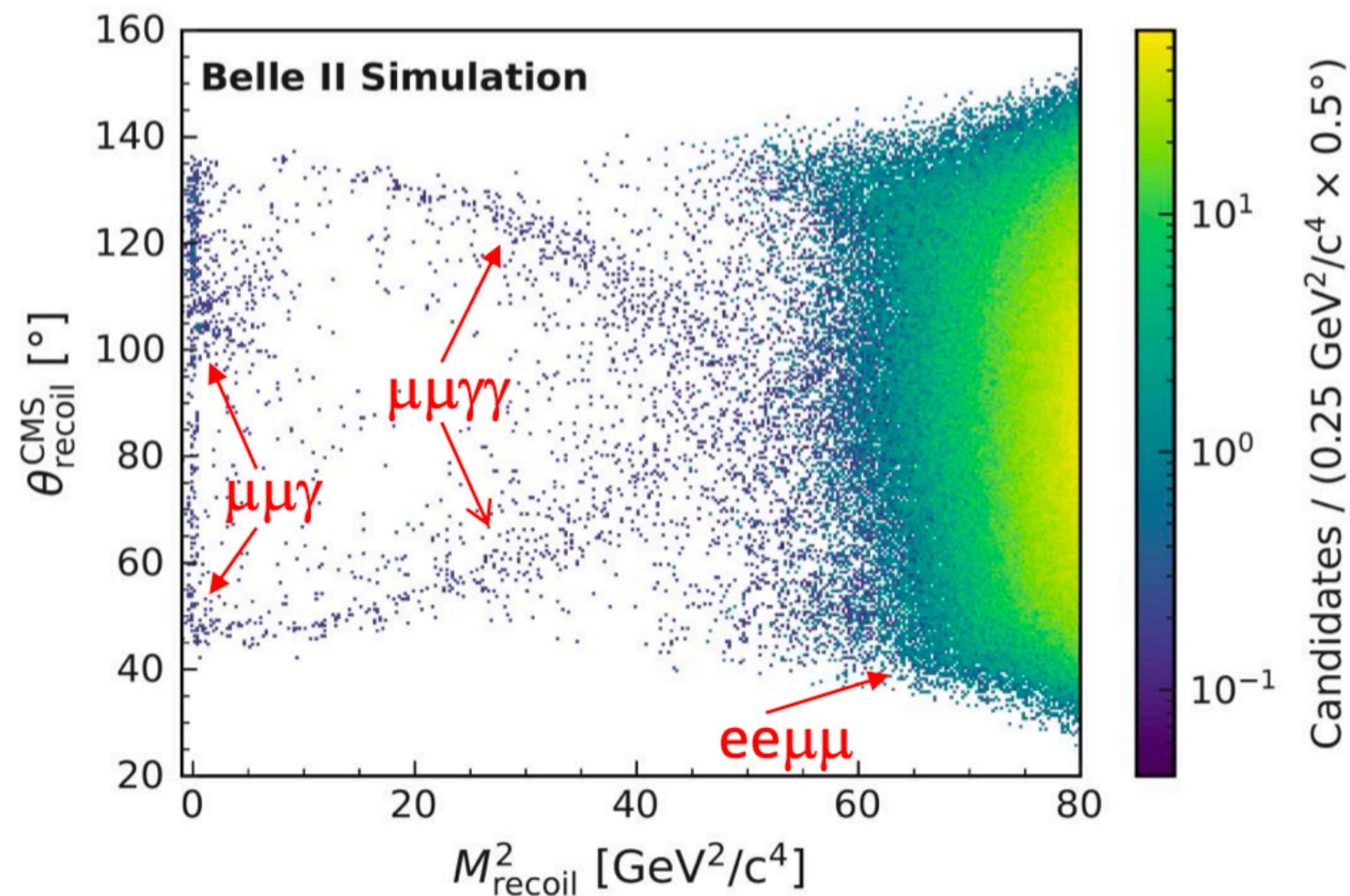
$\mu\mu\gamma$	selection+NN studies	low mass
$e\mu$	selection+NN studies	medium+high mass
$ee(\gamma)$	γ veto studies	

Look for bumps in $\theta_{\text{recoil}}^{\text{CMS}}$ vs M_{recoil}^2



Z' \rightarrow Invisible

- $\tau^+\tau^-(\gamma)$ almost 100% suppressed
- $\mu^+\mu^-(\gamma)$ dominates up to $\sim 7 \text{ GeV}/c^2$
- $e^+e^-\mu^+\mu^-$ dominates for high masses



Look for bumps in θ_{recoil} vs M_{recoil}^2

3 control samples

$\mu\mu\gamma$	selection+NN studies	low mass
$e\mu$	selection+NN studies	medium+high mass
$ee(\gamma)$	γ veto studies	

Systematics

Source	Low mass	Medium mass	High mass
selections	2.7%	6.5%	8.3%
Mass resolution	10%	10%	10%
Background shapes	3.2%	8.6%	25%
Photon veto	34%	5%	5%
luminosity	1%	1%	1%

$$Z' \rightarrow \tau\tau$$

- Background suppression: MLP (Multi-Layer Perceptron (NN)) based
 - ➔ 14 variables for the MVA training: sensitive to the presence of $\tau\tau$ resonance produced as FSR from one of the 2 μ

