



Beam dump 実験 と 新物理探索

Sho Iwamoto (岩本 祥)

ELTE Eötvös Loránd University

<http://pppheno.elte.hu/>

→ 國立中山大學 NSYSU (臺灣・高雄市) へ

10 Nov. 2022

Flavor Physics Workshop 2022 @ 静岡県伊豆の国市

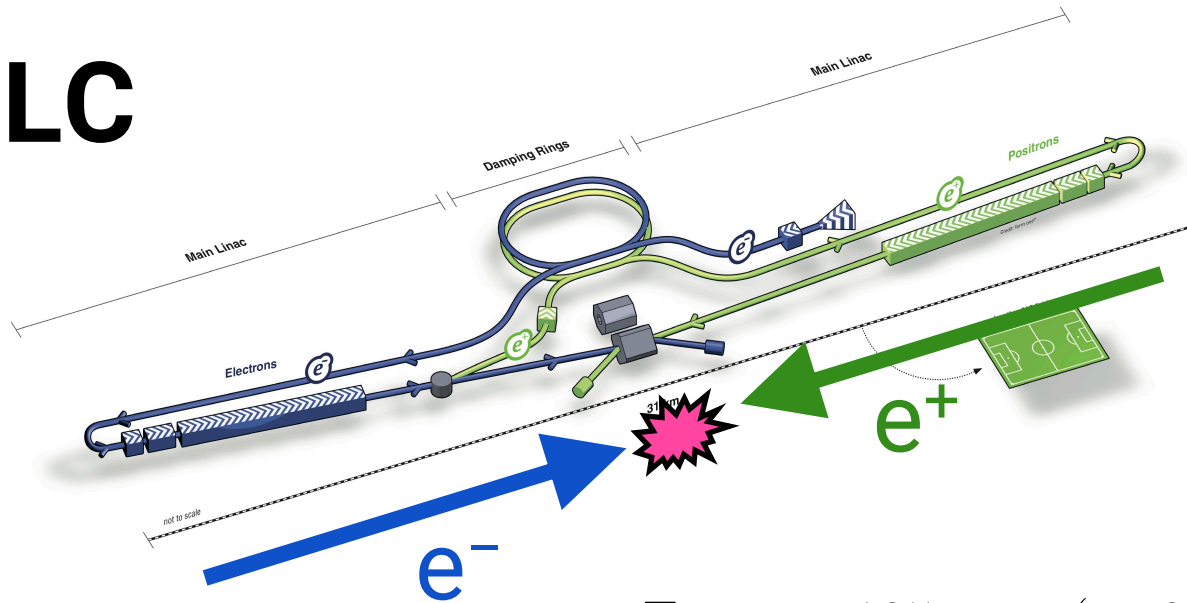
上田 大輝 (北京大 CHEP), 坂木 泰仁 (KEK), 浅井 健人 (東大 ICRR) の各氏との共同研究

arXiv:2105.13768 + α を中心に話します。

1. 導入 「ILC beam dump 実験」
2. 背後の理論 「探索対象は何？」
3. ILC beam dump 実験の特性評価
4. さらに詳しく (時間のある限り)

上田 大輝 (北京大 CHEP), 坂木 泰仁 (KEK), 浅井 健人 (東大 ICRR) の各氏との共同研究
[arXiv:2105.13768](https://arxiv.org/abs/2105.13768) + α を中心に話します。

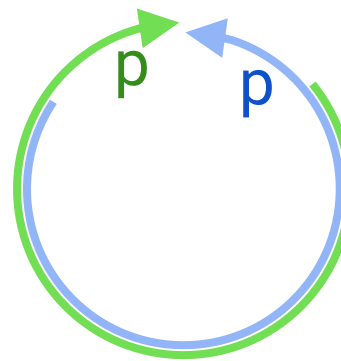
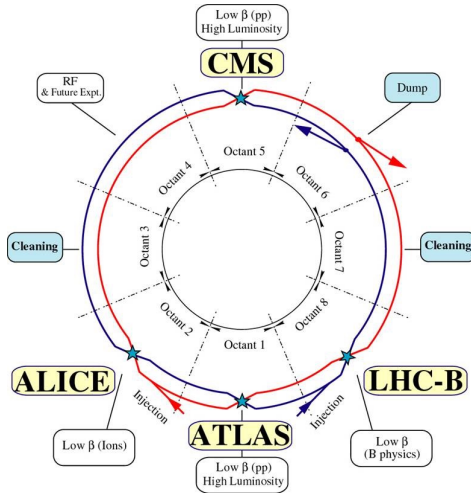
ILC



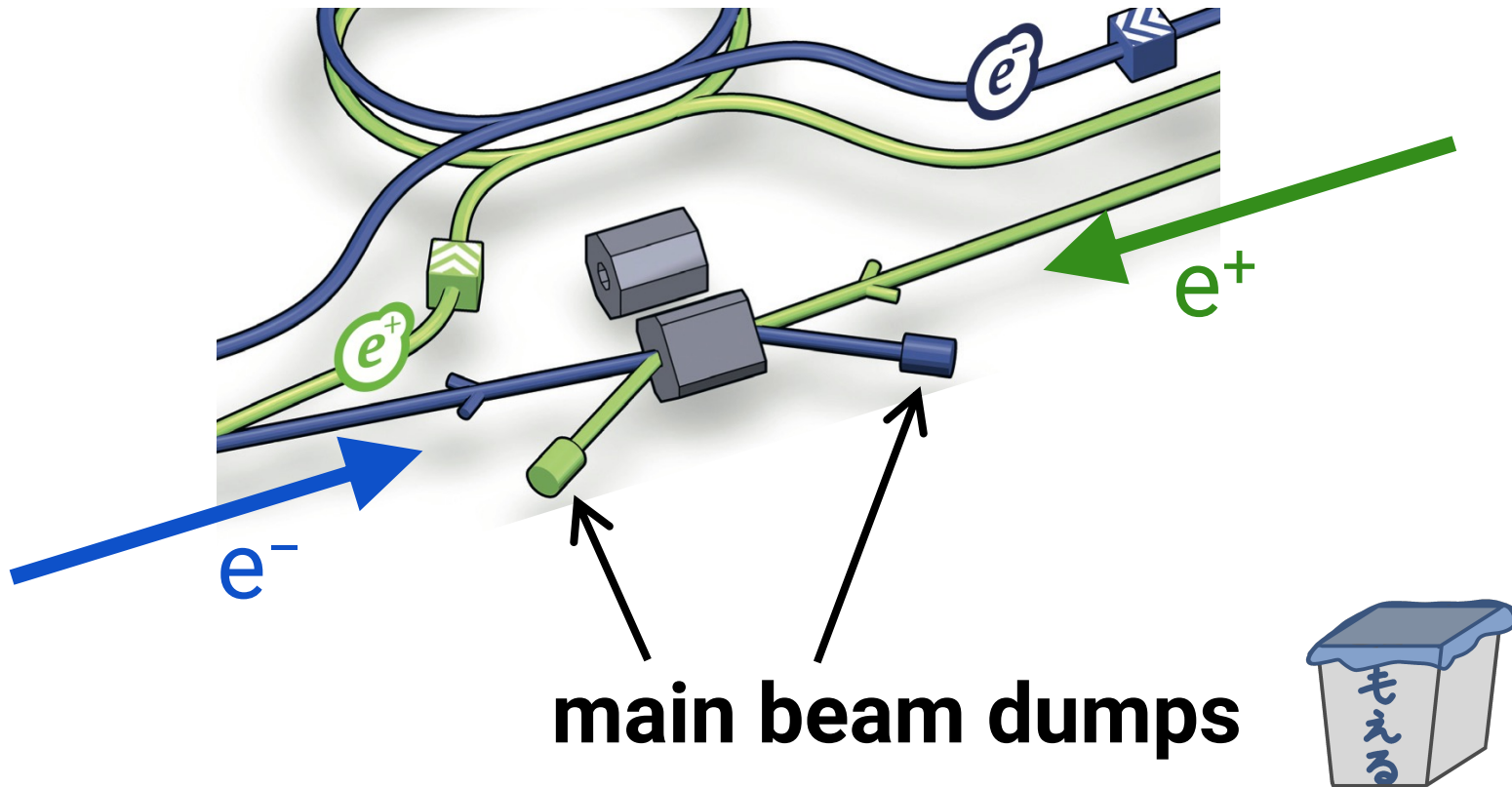
$$E_{\text{beam}} = 125 \text{ GeV} \quad (\rightarrow 250 \text{ GeV?} \rightarrow 500 \text{ GeV?})$$

Quiz: なぜまっすぐ？

(参考 : LHC @ CERN)



ILC

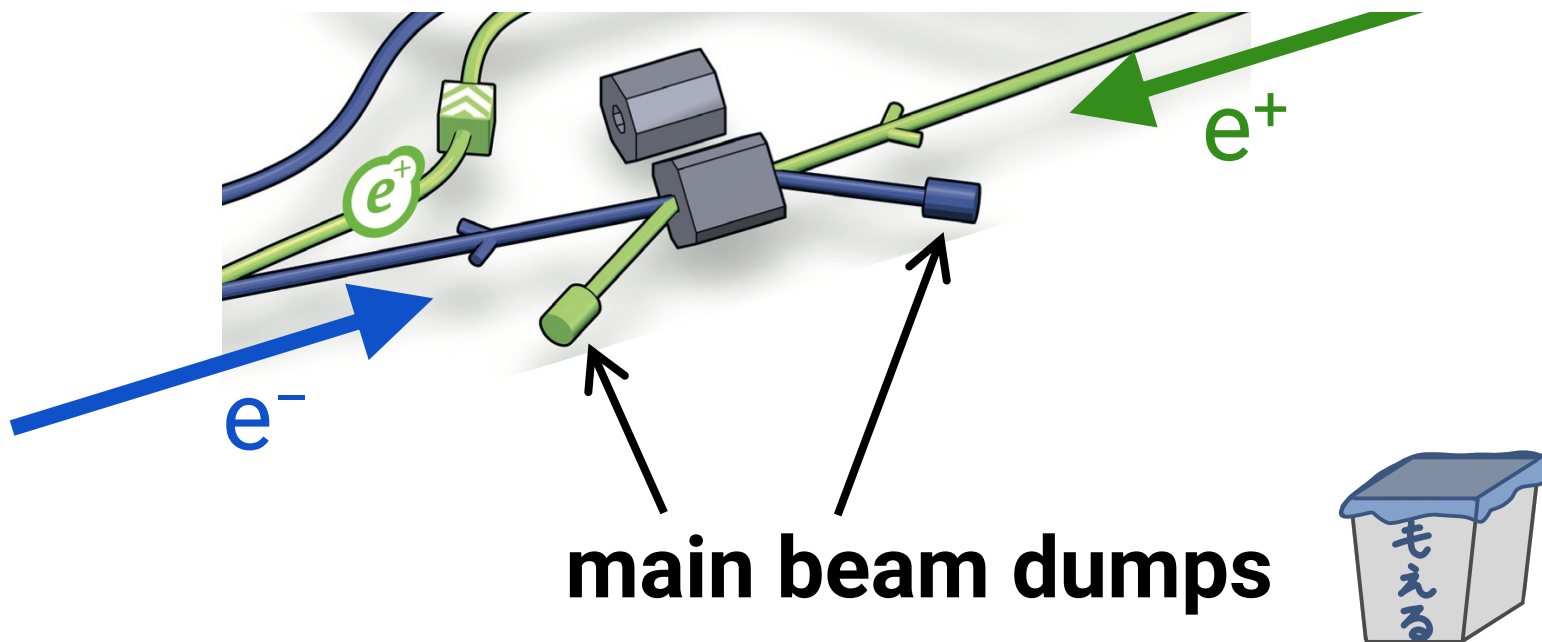


もったいない！ → SDGs

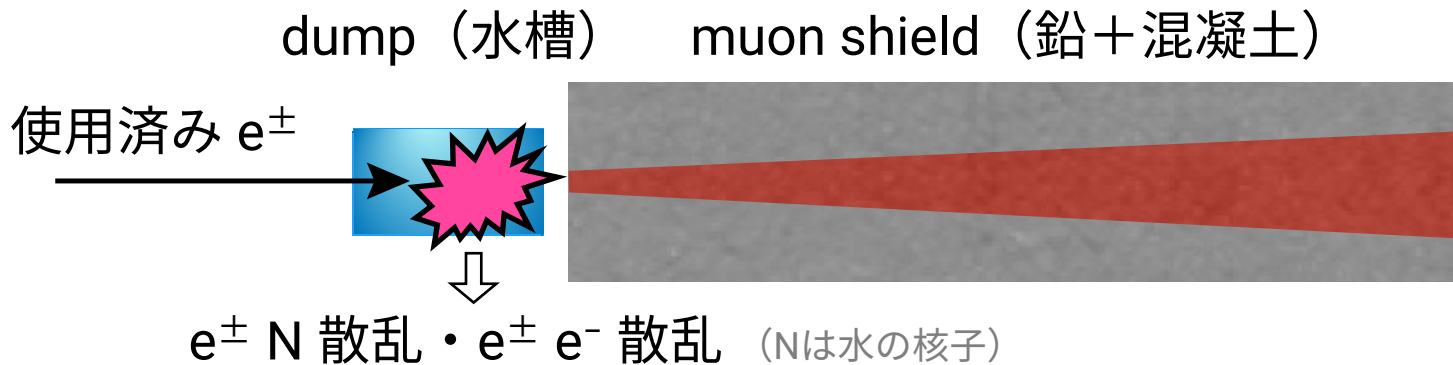
dump (水槽)

muon shield (鉛+混凝土)

使用済み e^\pm



もったいない！ → SDGs



固定標的衝突実験 『ILC beam dump 実験』 ができそう！

Kanemura, Moroi, Tanabe [[1507.02809](#)]

	center-of-mass energy $E_{CM} (= \sqrt{s})$	衝突頻度	値段
beam-beam 衝突	高い	少ない	高い
固定標的衝突	低い	多い	安い

特に ILC だと
beam は再利用
→ 検出器代のみ！

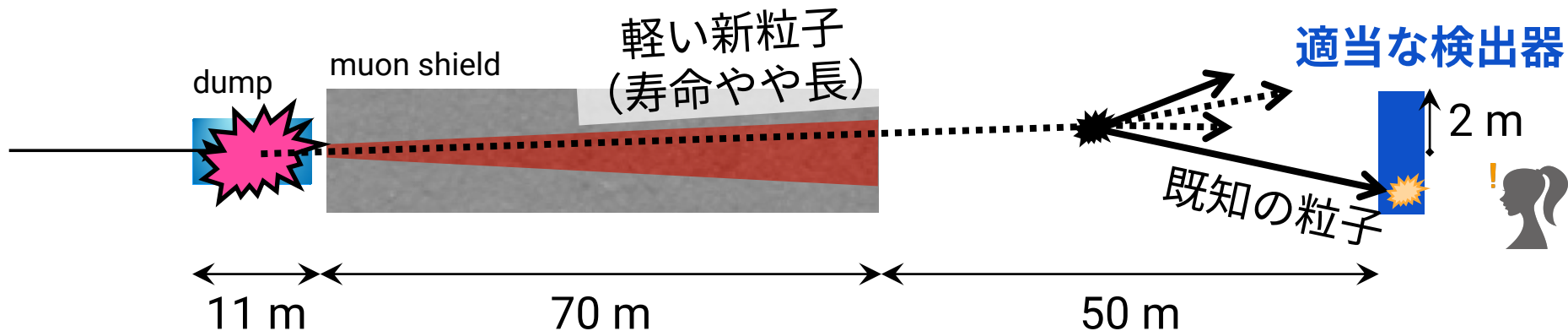
$E_{\text{beam}} = 125 \text{ GeV}$ なら (以下すべて同じ)

$$E_{CM} = \sqrt{2mE_{\text{beam}}} = \begin{cases} 15 \text{ GeV} & (e^\pm N) \\ 0.36 \text{ GeV} & (e^\pm e^-) \end{cases}$$

→ GeV より軽い新粒子を探す

Quiz: 導出

[解答→初日の渡邊さんの発表資料]



Sakaki, Ueda [[2009.13790](#)]
 Asai, Iwamoto, Sakaki, Ueda [[2105.13768](#)]

$E_{\text{beam}} = 125 \text{ GeV}$ なら (以下すべて同じ)

$$E_{\text{CM}} = \sqrt{2mE_{\text{beam}}} = \begin{cases} 15 \text{ GeV} & (e^{\pm}N) \\ 0.36 \text{ GeV} & (e^{\pm}e^{-}) \end{cases}$$

→ GeV より軽く, shield をすりぬけ,
 100 m 程で崩壊する新粒子を探す

【資料用】類似の実験たち.....のごく一部。

固定標的実験	時代と場所	特性 (粒子数, 検出器までの距離など)			
RSC, CIB, BHOP	1979, BNL	p,	28 GeV,	計 10^{19} 個,	43–105 m
ABCDLOS, CDHS, CHARM	1979, CERN	p,	400 GeV,	計 10^{18} 個,	820–910 m
CHARM II	1991, CERN	p,	450 GeV,	10^{19} 個,	870 m
U70 (ν -Cal I)	1989, Serpukhov	p,	70 GeV,	10^{18} 個,	70 m
E141	1987, SLAC	e^-	9 GeV,	10^{15} 個,	40 m
E137	1988, SLAC	e^- ,	20 GeV,	10^{20} 個,	400 m
E774	1991, FNAL	e^- ,	275 GeV,	10^{10} 個,	2 m
KEK LBDX	1986, KEK	e^- ,	2.5 GeV,	10^{17} 個,	5 m
Orsay	1989, Orsay	e^- ,	1.6 GeV,	10^{16} 個,	3 m
PADME	現在, Frascati	陽電子,	0.55 GeV,	10^{13} 個/年,	$O(1)$ m
BDX @ Jefferson Lab	2027?, JLab	e^- ,	11 GeV,	10^{22} 個/年,	20 m
SHiP	LHC Run 4, CERN	p,	400 GeV,	10^{19} 個/年,	120 m
DARKMESA	????, Mainz	e^- ,	0.16 GeV,	10^{22} 個/年,	30 m
ILC beam dump	????, Iwate	e^- /陽電子,	125 GeV,	10^{21} 個/年,	120 m
逃げる粒子を捕獲する実験					
FASER [cf. 浅井さんの講演]	現在, CERN	ATLAS から前方に逃げる長寿命粒子			
MATHUSLA, ANUBIS, CODEX-b	LHC Run 4, CERN	それぞれ CMS / ATLAS / LHCb 衝突点から横に逃げる長寿命粒子			

このまとめは主観的 (雑) なのでそのままの利用・転載は非推奨。数字はすべて概数。LSND, MiniBooNE などの neutrino 系実験も beam dump 実験の一種(?)だがここには非掲載。他にも NA64e, NA64 μ など類似の重要な実験はたくさん。覚えられない。参考文献：たとえば Dydak [CERN-EP-80-204], Andreas, Niebuhr, Ringwald [1209.6083]

TABLE I: Summary of dark photon experiments.

Experiment	Lab	Production	Detection	Vertex	Mass(MeV)	Mass Res. (MeV)	Beam	Ebeam (GeV)	Ibeam or Lumi	Machine	Ist Run	Next Run
APEX	JLab	e-brem	$\ell^+\ell^-$	no	65 – 600	0.5%	e^-	1.1–4.5	150 μ A	CEBAF(A)	2010	2018
A1	Mainz	e-brem	e^+e^-	no	40 – 300	?	e^-	0.2–0.9	140 μ A	MAMI	2011	–
HPS	JLab	e-brem	e^+e^-	yes	20 – 200	1–2	e^-	1–6	50–500 nA	CEBAF(B)	2015	2018
DarkLight	JLab	e-brem	e^+e^-	no	< 80	?	e^-	0.1	10 mA	LERF	2016	2018
MAGIX	Mainz	e-brem	e^+e^-	no	10 – 60	?	e^-	0.155	1 mA	MESA	2020	–
NA64	CERN	e-brem	e^+e^-	no	1 – 50	?	e^-	100	2×10^{11} EOT/yr	SPS	2017	2022
Super-HPS	SLAC	e-brem	vis	yes	< 500	?	e^-	4 – 8	1 μ A	DASEL	?	?
(TBD)	Cornell	e-brem	e^+e^-	?	< 100	?	e^-	0.1-0.3	100 mA	CBETA	?	?
VEPP3	Budker	annih	invis	no	5 – 22	1	e^+	0.500	10^{33} cm ⁻² s ⁻¹	VEPP3	2019	?
PADME	Frascati	annih	invis	no	1 – 24	2 – 5	e^+	0.550	$\leq 10^{14}$ e ⁺ OT/y	Linac	2018	?
MMAPS	Cornell	annih	invis	no	20 – 78	1 – 6	e^+	6.0	10^{34} cm ⁻² s ⁻¹	Synchr	?	?
KLOE 2	Frascati	several	vis/invis	no	< 1.1 GeV	1.5	e^+e^-	0.51	2×10^{32} cm ⁻² s ⁻¹	DAφNE	2014	-
Belle II	KEK	several	vis/invis	no	$\lesssim 10$ GeV	1 – 5	e^+e^-	4 × 7	1 ~ 10 ab ⁻¹ /y	Super-KEKB	2018	-
SeaQuest	FNAL	several	$\mu^+\mu^-$	yes	$\lesssim 10$ GeV	3 – 6%	p	120	10 ¹⁸ POT/y	MI	2017	2020
SHIP	CERN	several	vis	yes	$\lesssim 10$ GeV	1 – 2	p	400	2×10^{20} POT/5y	SPS	2026	-
LHCb	CERN	several	$\ell^+\ell^-$	yes	$\lesssim 40$ GeV	~ 4	pp	6500	~ 10 fb ⁻¹ /y	LHC	2010	2015

【資料用】世界の beam dump から

Laboratory	Name	Particle	Max Beam Power
ILC	Main Beam Dump	e^- & e^+	1 st stage:2.6MW(125GeV×21μA) Upgrade:14MW(500GeV×28μA)
SLAC	Water Dump (at End-Station) [4]	e^- & e^+	2.2MW (ex. 20GeV×110μA)
SLAC	SL-30[5]	e^-	600kW (20GeV×30μA)
Jefferson Lab	Beam Dump (Hall A & B) [6]	e^-	1MW (ex. 5GeV ×200μA)
E-XFEL	Main Beam Dump [7]	e^-	300kW (ex. 25GeV×12μA)
KEK	SKEKB Beam Dump [8]	e^- & e^+	182kJ (7GeV×26μC)
CERN	HL-LHC Beam Dump [9]	Proton	680MJ (7TeV×97μC)
J-PARC	Neutron Target [10]	Proton	1MW (3GeV×333μA)
J-PARC	Hadron-hall Beam Dump [11]	Proton	750kW (50GeV×15μA)
J-PARC	Neutrino-facility Beam Dump [12]	Proton	750kW (30GeV×25μA)
ESS	Neutron Target [13]	Proton	5MW (2GeV×2.5mA)
IFMIF LIPAc	Beam Dump (at Linac End) [14]	Deuteron	1.125MW (9MeV×125mA)

*上記の通り抜粋したが、他にも大強度ビームダンプ事例はある。

*Max Beam Power は設計時に想定した値である。必ずしも運転実績があるわけではない。

* e^- & e^+ は電子と陽電子を指す。

*SKEKB Beam Dump、HL-LHC Beam Dump は1度に止めるビーム熱量(J)を示す。

*J-PARC や ESS の Neutron Target はビームをフルストップする。ビームダンプも担っている。

1. 導入

- ✓ ILC beam dump での固定標的散乱実験。
- ✓ 固定標的実験の特性。「やや長寿命な軽い新粒子」。

2. 背後の理論 「探索対象は何？」

3. ILC beam dump 実験の特性評価

4. さらに詳しく (時間のある限り)

!!! 暗黒物質

!!! 暗黒 energy

!!! 重力の量子化

!!! ν の質量

!? Muon $g-2$ の逸脱

!? Flavor 関連過程の逸脱 ($b \rightarrow s\mu\mu$, $R(D)$, $R(D^*)$, ...)

!? Baryon 非対称性の起源

? 宇宙の一様等方性の由来

? U(1)電荷が有理数である理由

? Scalar 粒子が 1 世代しかない不思議

? θ_{QCD} が微小な理由 (strong CP 問題)

? 標準模型 parameters の由緒

→ どうせまた

新粒子があるんでしょ？ (安易)

→ 「新粒子探索」

!!! 暗黒物質

!!! 暗黒 energy

!!! 重力の量子化

!!! ν の質量

!? Muon $g-2$ の逸脱

!? Flavor 関連過程の逸脱 ($b \rightarrow s\mu\mu$, $R(D)$, $R(D^*)$, ...)

!? Baryon 非対称性の起源

? 宇宙の一様等方性の由来

? U(1)電荷が有理数である理由

? Scalar 粒子が 1 世代しかない不思議

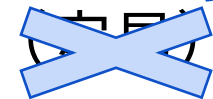
? θ_{QCD} が微小な理由 (strong CP 問題)

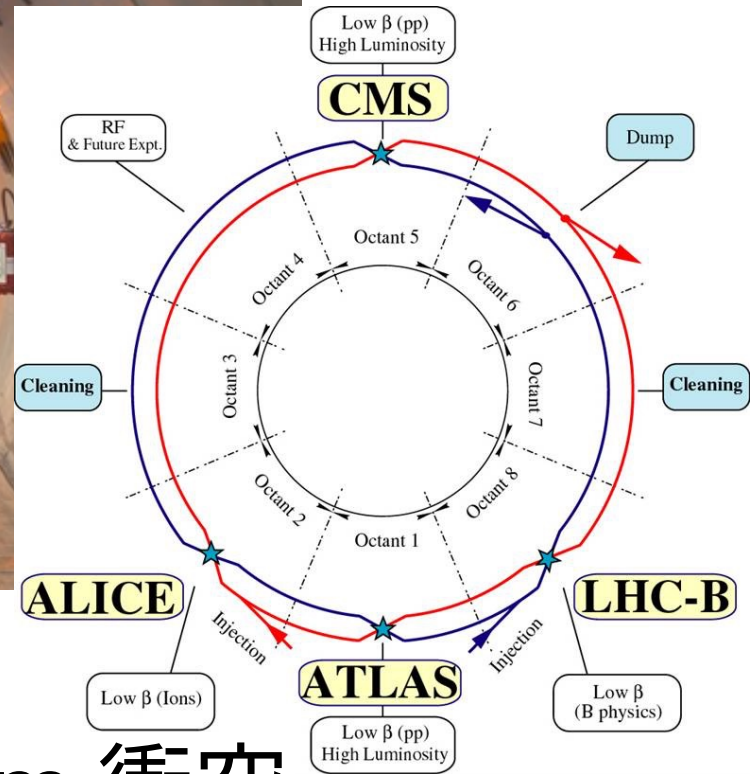
? 標準模型 parameters の由緒

→ どうせまた
新粒子があるんでしょ？

→ 「新粒子探索」

(素直で
妥当な
言説s)

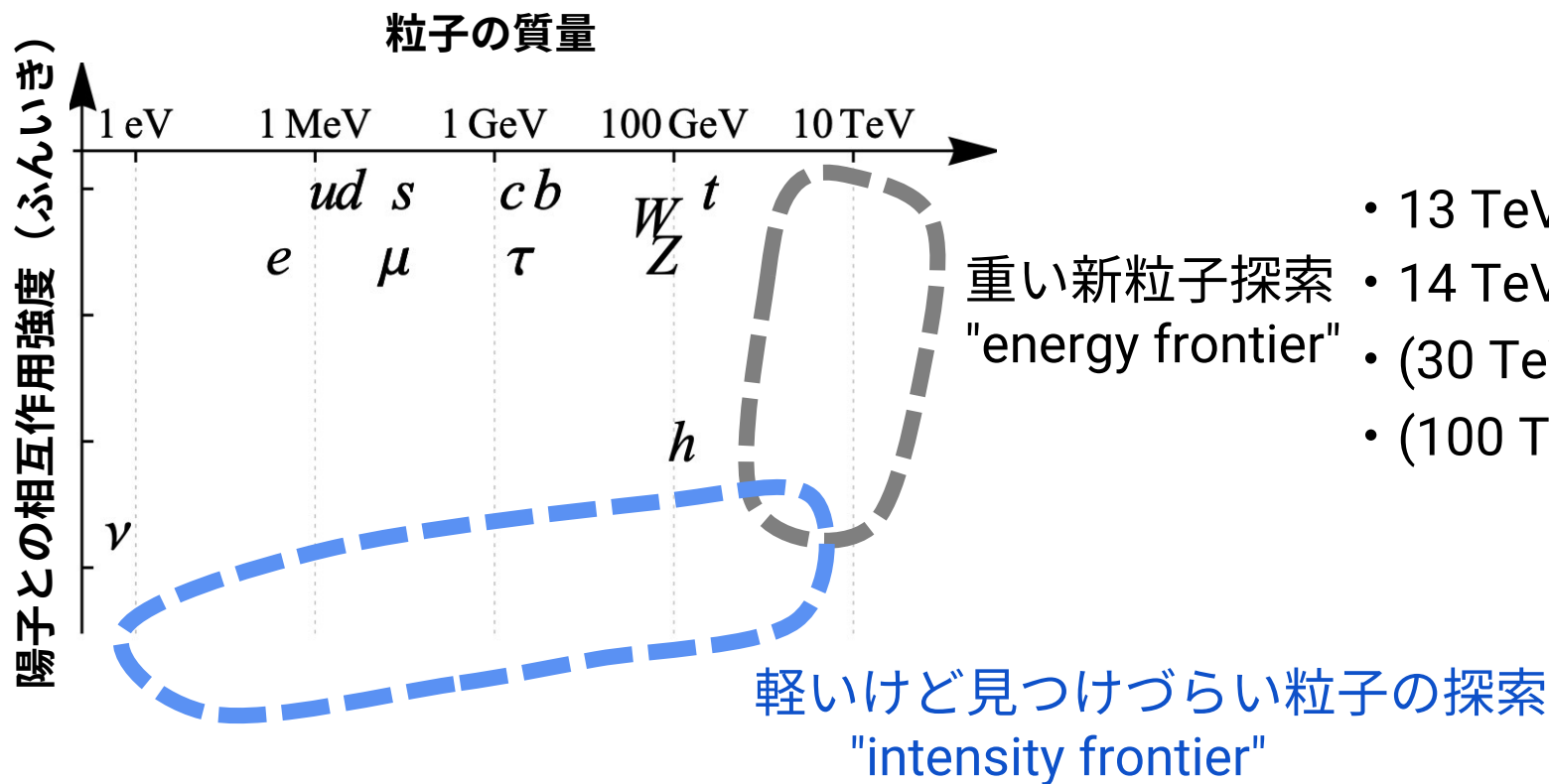




$\sqrt{s} = 7-14 \text{ TeV p-p beam 衝突}$

- Higgs 粒子を発見した。 (標準模型の完成)
- Higgs 機構 / Yukawa 扇区の妥当性を検証した。

EF と IF, 両方の frontiers を攻めていくのが賢い。

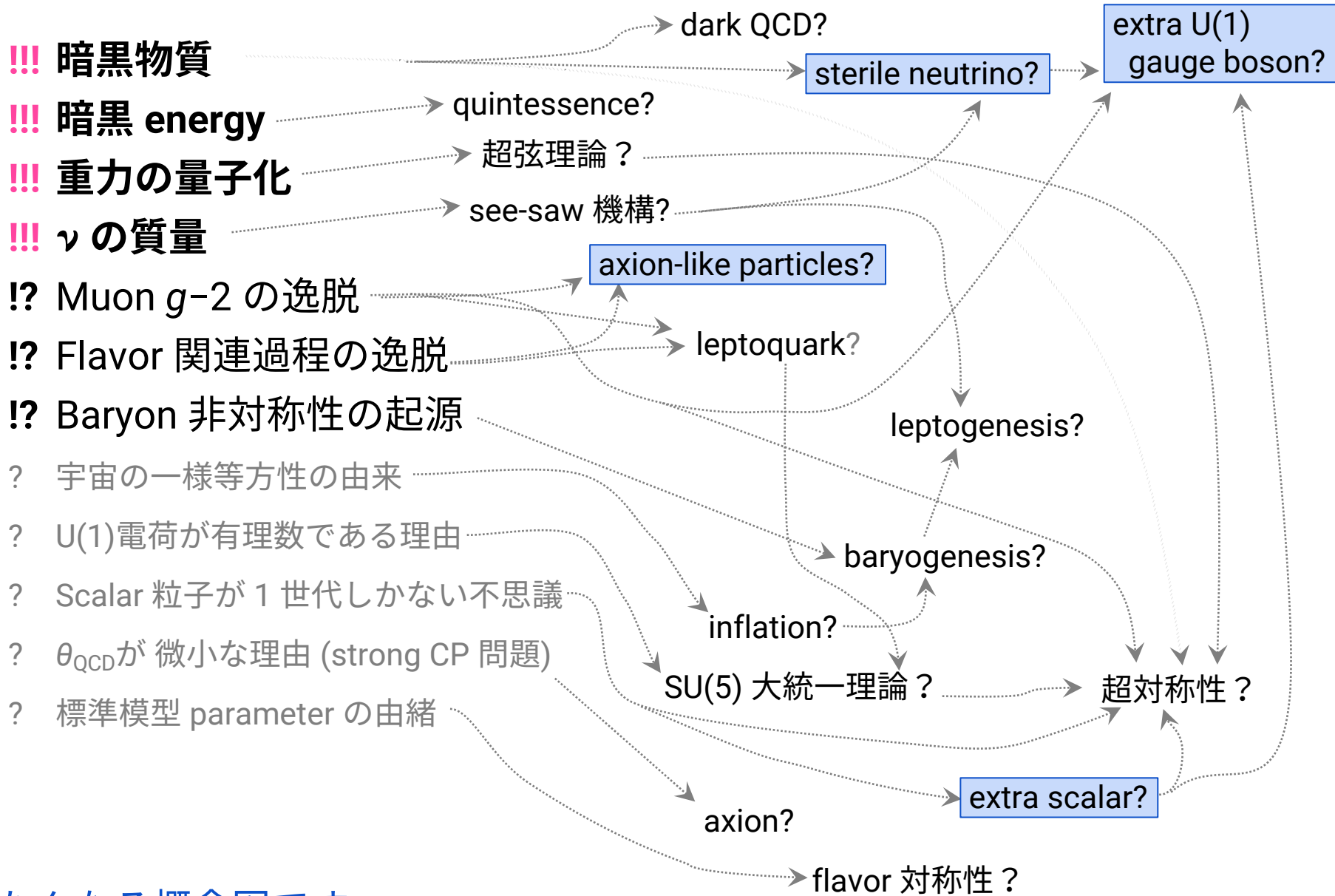


- 13 TeV LHC
- 14 TeV HL-LHC
- (30 TeV HE-LHC?)
- (100 TeV FCC-hh?)

- Belle (1040 /fb)
- Belle II (50000 /fb?)
- 固定標的実験
- (ILC : 3000 /fb?)

	E_{CM}	衝突頻度	値段
beam-beam	高い→EF	少ない	高い
固定標的	低い	多い→IF	安い

どんな sub-GeV 新粒子を探す？



(たんなる概念図です。
実際に探索できるかは仮設模型の詳細しだい。)

今回はとりあえず benchmark 用の安易な単純な scenarios で。

■ Dark photon 『もしも U(1) 対称性がもう 1 つあったら.....』

$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{4}F'^{\mu\nu}F'_{\mu\nu} + \frac{m_{A'}^2}{2}A'^{\mu}A'_{\mu} - \frac{\epsilon}{2}F^{\mu\nu}F'_{\mu\nu}$$

光子と混合しがち 誘発

$$\mathcal{L}_{\text{int}} \simeq -\epsilon|e|A'_{\mu}j_{\text{em}}^{\mu}$$

■ Axion-like particles (ALPs) なぜか人気の模型 (理由は知らない)

$$\mathcal{L} \supset \frac{1}{2}\partial_{\mu}a\partial^{\mu}a - \frac{1}{2}m_a^2a^2 + \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \frac{1}{2} \frac{c_{\text{all}}}{\Lambda} \partial_{\mu}a \bar{\ell} \gamma^{\mu} \gamma_5 \ell - \frac{1}{4}g_{a\gamma\gamma}aF_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu}$$

lepton との相互作用を (勝手に) 仮定 (光子との相互作用も誘発)

■ Extra scalar boson 『もう 1 つぐらい scalar あるやろ (安易) 』

$$\mathcal{L} \supset \frac{1}{2}(\partial_{\mu}S)^2 - \frac{1}{2}m_S^2S^2 - \sum_{\ell=e,\mu,\tau} g_{\ell}S\bar{\ell}\ell - \frac{1}{4}g_{S\gamma\gamma}SF_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

lepton との相互作用を (勝手に) 仮定 (光子との相互作用も誘発)

今回は新粒子1個だけ，質量と結合強度だけで定まる scenarios で。

vector

■ Dark photon 『もしも U(1) 対称性がもう 1 つあったら.....』

$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{4} F'^{\mu\nu} F'_{\mu\nu} + \frac{m_{A'}^2}{2} A'^{\mu} A'_{\mu} - \frac{\epsilon}{2} F^{\mu\nu} F'_{\mu\nu} \quad \mathcal{L}_{\text{int}} \simeq -\epsilon |e| A'_{\mu} j_{\text{em}}^{\mu}$$

光子と混合しがち 誘発

奇-CP scalar

■ Axion-like particles (ALPs) なぜか人気の模型 (理由は知らない)

$$\mathcal{L} \supset \frac{1}{2} \partial_{\mu} a \partial^{\mu} a - \frac{1}{2} m_a^2 a^2 + \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \frac{1}{2} \frac{c_{\text{all}}}{\Lambda} \partial_{\mu} a \bar{\ell} \gamma^{\mu} \gamma_5 \ell - \frac{1}{4} g_{a\gamma\gamma} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$

lepton との相互作用を (勝手に) 仮定 (光子との相互作用も誘発)

偶 CP scalar

■ Extra scalar boson 『もう 1 つぐらい scalar あるやろ (安易) 』

$$\mathcal{L} \supset \frac{1}{2} (\partial_{\mu} S)^2 - \frac{1}{2} m_S^2 S^2 - \sum_{\ell=e,\mu,\tau} g_{\ell} S \bar{\ell} \ell - \frac{1}{4} g_{S\gamma\gamma} S F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

lepton との相互作用を (勝手に) 仮定 (光子との相互作用も誘発)

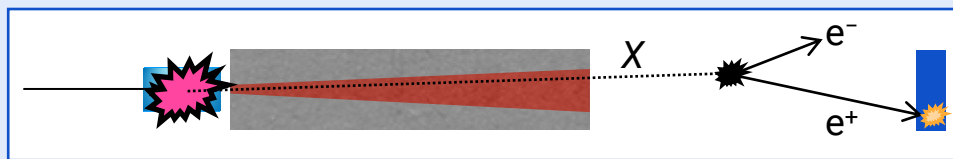
今回は新粒子1個だけ, 質量と結合強度だけで定まる scenarios で。

■ Dark photon 『もしも U(1) 対称性がもう1つあったら.....』

$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{4} F'^{\mu\nu} F'_{\mu\nu} + \frac{m_{A'}^2}{2}$$

3 模型とも

- Higgs 機構が起きたあとの表式 (有効理論)。
- 新粒子は主に e^-e^+ に崩壊 (=検出は容易)。



lepton との相互作用を (勝手に) 仮定 (光子との相互作用も誘発)

■ Extra scalar boson

$$\mathcal{L} \supset \frac{1}{2} (\partial_\mu S)^2 - \frac{1}{2} m_S^2 S^2$$

➤ あまり美しい模型ではない。 (主観)

* Quark との結合を入れると, flavor violation 系の制限 (中間子崩壊) が出てくるので議論が大変。

Cf. Bauer, Neubert, Renner, Schnubel, Thamm [2110.10698]

lepton との相互作用を (勝手に) 仮定 (光子との相互作用も誘発)

Dark photon

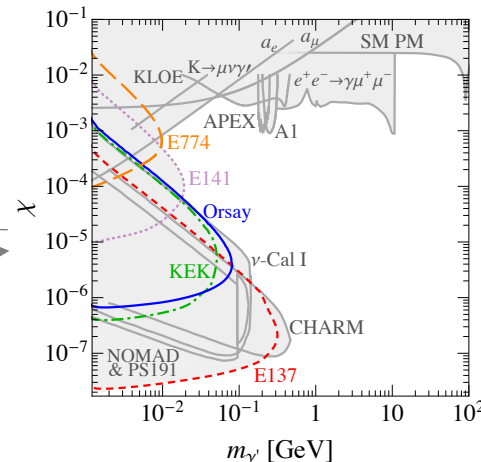
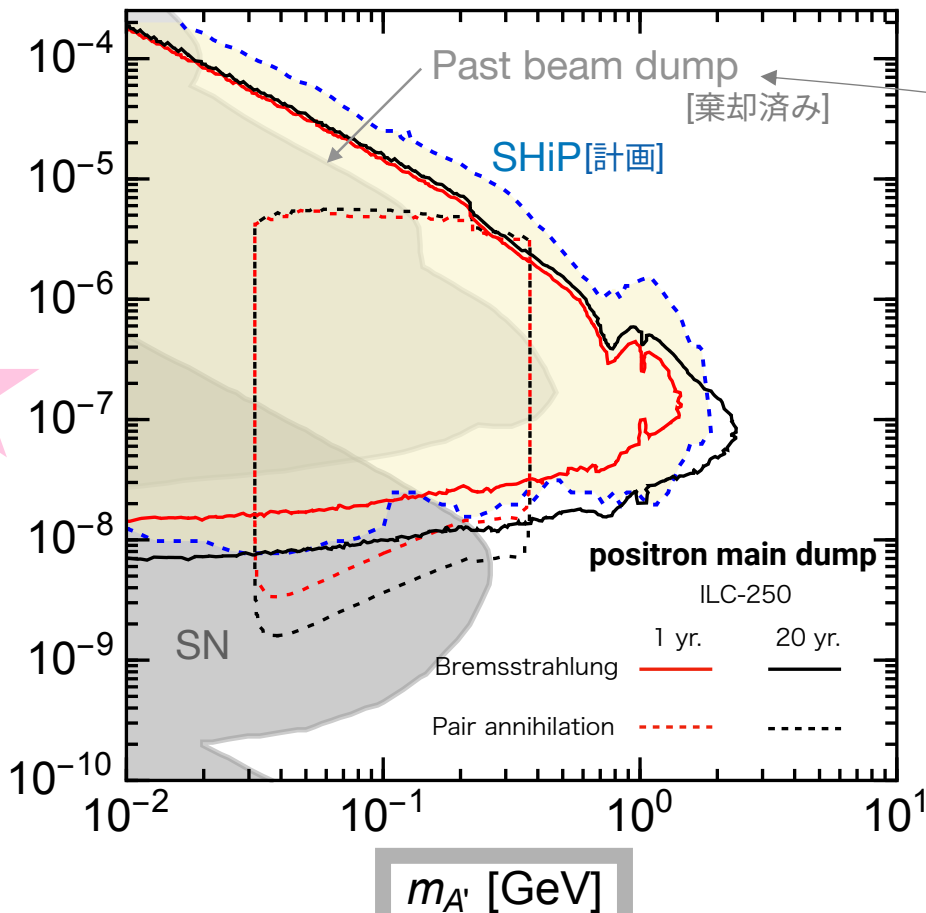
『もしも U(1) 対称性がもう 1 つあったら.....』

$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{4} F'^{\mu\nu} F'_{\mu\nu} + \frac{m_{A'}^2}{2} A'^{\mu} A'_{\mu} - \frac{\epsilon}{2} F^{\mu\nu} F'_{\mu\nu}$$

$$\mathcal{L}_{\text{int}} \simeq -\epsilon |e| A'_{\mu} j_{\text{em}}^{\mu}$$

含しがち

誘発



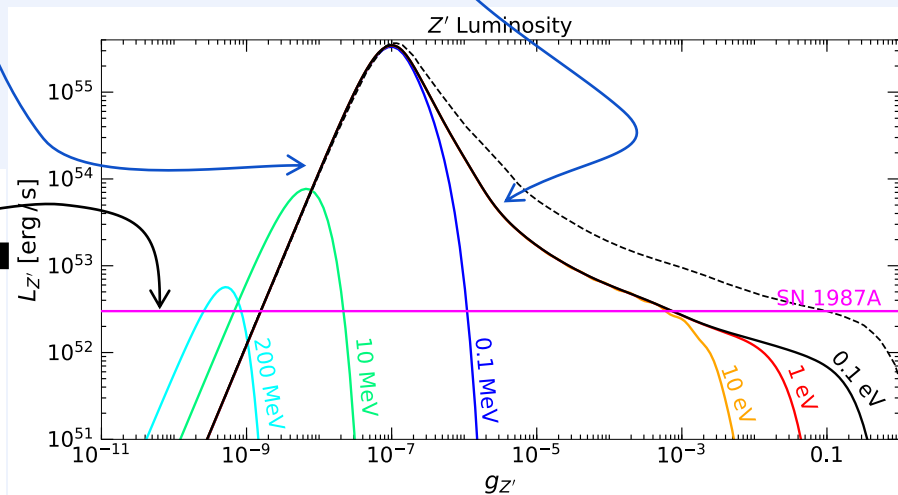
E774	1991, FNAL	e ⁻ ,	275 GeV,	10 ¹⁰ 個,	2 m
E141	1987, SLAC	e ⁻	9 GeV,	10 ¹⁵ 個,	40 m
Orsay	1989, Orsay	e ⁻ ,	1.6 GeV,	10 ¹⁶ 個,	3 m
KEK LBDX	1986, KEK	e ⁻ ,	2.5 GeV,	10 ¹⁷ 個,	5 m
CHARM II	1991, CERN	p,	450 GeV,	10 ¹⁹ 個,	870 m
E137	1988, SLAC	e ⁻ ,	20 GeV,	10 ²⁰ 個,	400 m
ILC beam dump	????, Iwate	e ⁻ / e ⁺ ,	125 GeV,	10 ²¹ 個/年,	120 m
SHiP	LHC Run 4, CERN	p,	400 GeV,	10 ¹⁹ 個/年,	120 m

SN: 1987A の爆発 energy を DP [存在すれば] が持ち逃げするから観測結果と矛盾する)
 Past beam dump: 参考文献 Andreas, Niebuhr, Ringwald [1209.6083] (中段右図)

結合が小さすぎると Z' は生成されない

結合が大きすぎると Z' はSN に再捕獲される

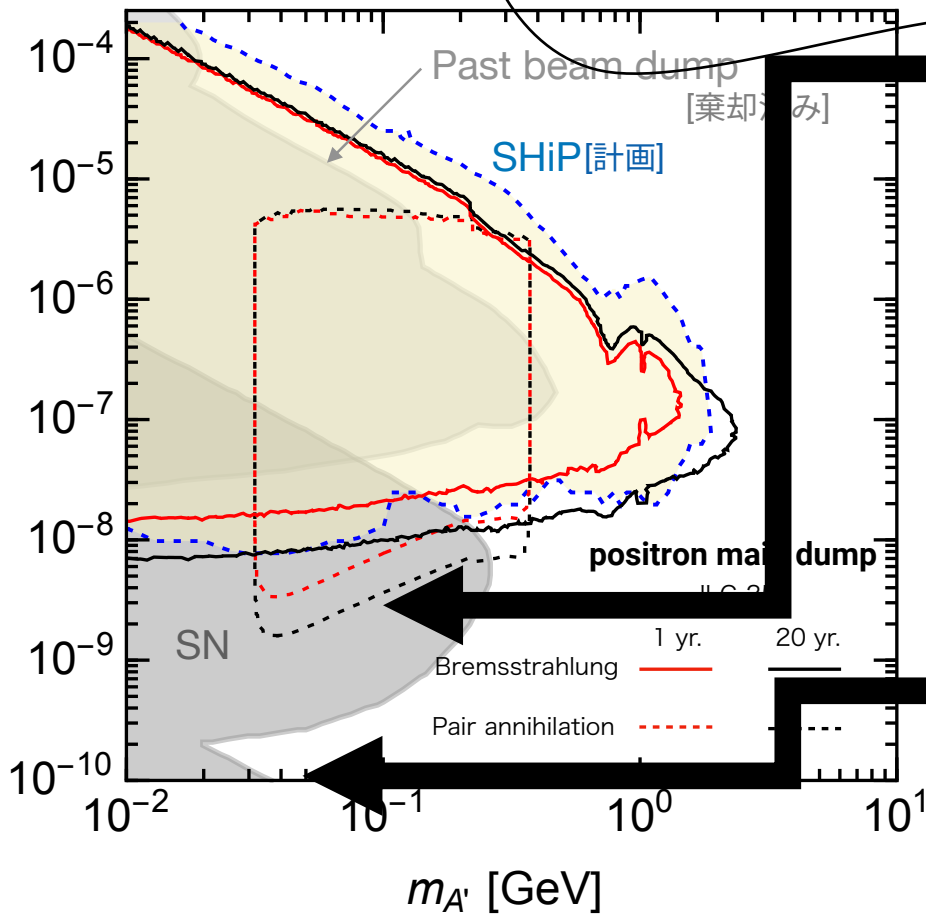
縦軸は SN1987A から Z' が持ち逃げする energy。
 3×10^{52} erg/s ("Raffelt criterion" と呼ばれる) とか
 10^{53} erg/s とか以上だとマズカろう, という議論がある。



Croon, Elor, Leane, McDermott [2006.13942]
 (ただしこれは $L_\mu-L_\tau$ gauge boson の plot)

SN1987A 内で出来た Z' が, SN から脱出したあとに γ に崩壊すると, その γ が地球上で観測されることになり, SN1987A の観測と矛盾する。

cf. DeRocco, Graham, Kasen, MarquesTavares, Rajendran [1901.08596]



1. 導入

- ✓ ILC beam dump での固定標的散乱実験。
- ✓ 固定標的実験の特性。「やや長寿命な軽い新粒子」。

2. 背後の理論

- ✓ Intensity frontier：眼前に茫漠荒寥たり。
- ✓ よく使われる benchmark 模型：Dark photon, ALP, extra scalar。
- ✓ 過去の全実験よりもよさそう。

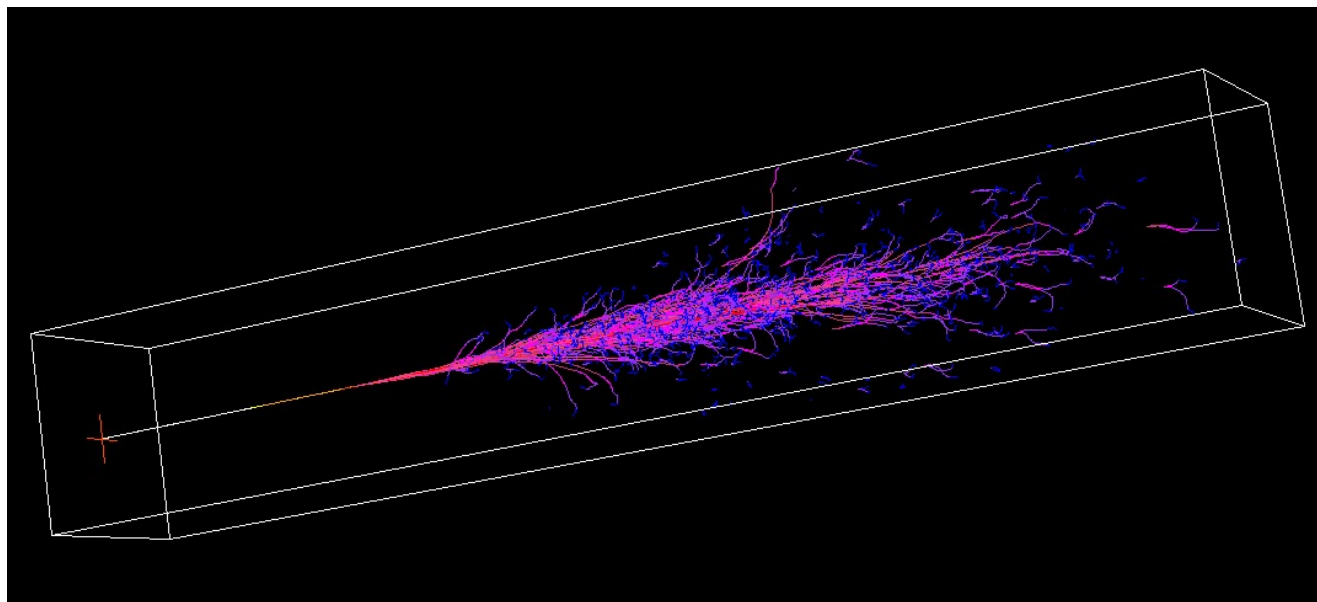
3. ILC beam dump 実験の特性評価

4. さらに詳しく (時間のある限り)

■ e^\pm や γ が物質に入射すると.....

Quiz: Muon では shower は起きない。なぜ？

[cf. 3日目の廣瀬さん講演]



24 GeV e^- on iron, from [the Electromagnetic Shower Simulator](#) by Sven Menke.

参考資料

	$\langle Z/A \rangle$	Nucl.coll. length λ_T {g cm ⁻² }	Nucl.inter. length λ_I {g cm ⁻² }	Rad.len. X_0 {g cm ⁻² }	$dE/dx _{min}$ {MeV g ⁻¹ cm ² }	Density {g cm ⁻³ }	Melting point {K}	Boiling point {K}
Pb	0.39575	114.1	199.6	6.37	1.122	11.350	600.6	2022.
Water (H ₂ O)	0.55509	58.5	83.3	36.08	1.992	1.000	273.1	373.1

$$E(z) \sim E_0 e^{-\rho z / X_0}$$

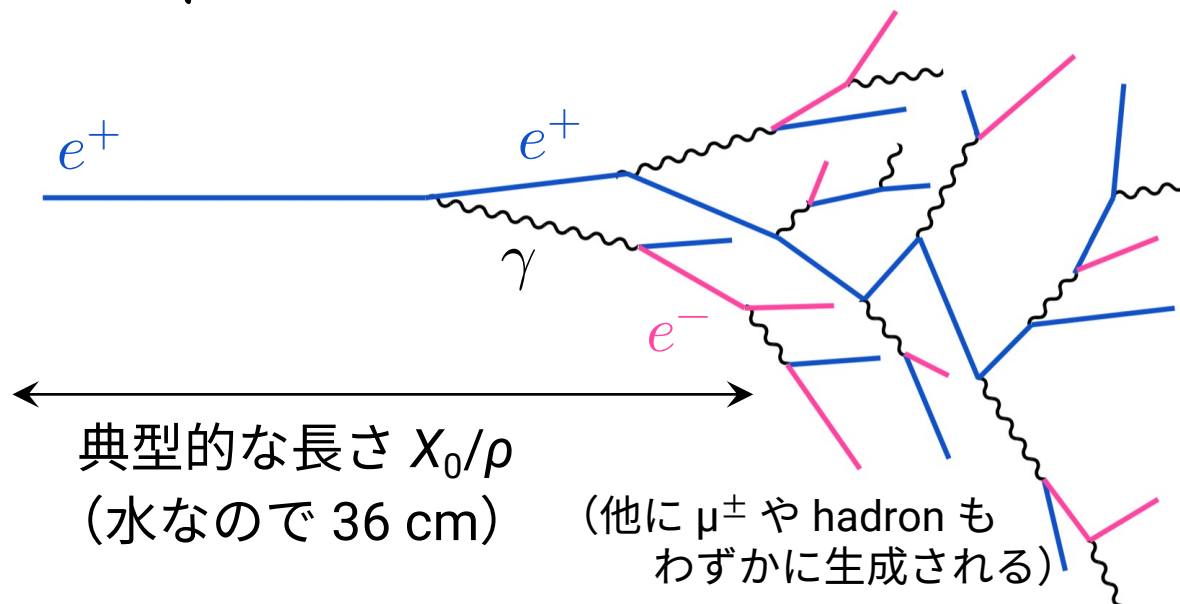
$$X_0 \sim 100 \text{ g/cm}^2 \frac{A}{Z^2}$$

[PDG2022 §6, §34] **23** / 43

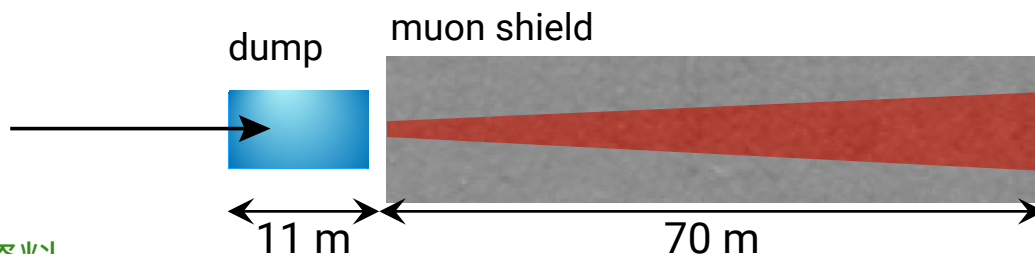
■ e^\pm や γ が物質に入射すると.....

Quiz: Muon では shower は起きない。なぜ？

[cf. 3日目の廣瀬さん講演]



radiation length
 X_0 : 物質の輻射長
 ρ : 物質の密度



Shower より遙かに厚い：

"厚い固定標的実験"

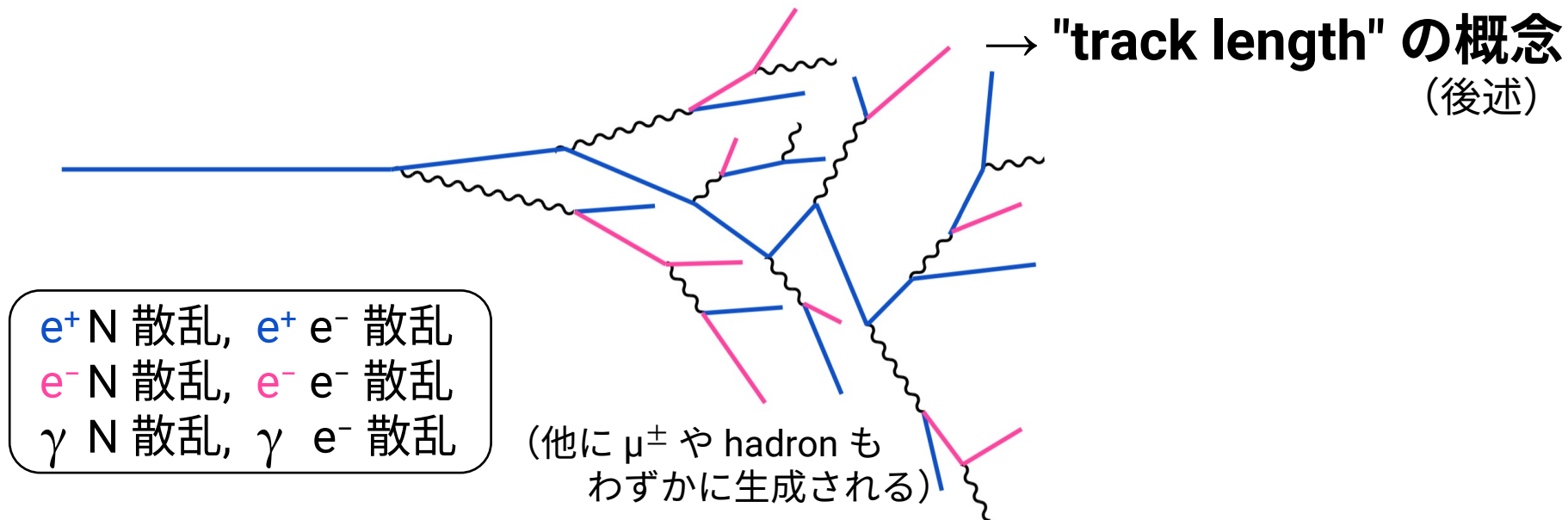
参考資料

	$\langle Z/A \rangle$	Nucl.coll. length λ_T {g cm ⁻² }	Nucl.inter. length λ_I {g cm ⁻² }	Rad.len. X_0 {g cm ⁻² }	$dE/dx _{min}$ {MeV g ⁻¹ cm ² }	Density {g cm ⁻³ }	Melting point {K}	Boiling point {K}
Pb	0.39575	114.1	199.6	6.37	1.122	11.350	600.6	2022.
Water (H ₂ O)	0.55509	58.5	83.3	36.08	1.992	1.000	273.1	373.1

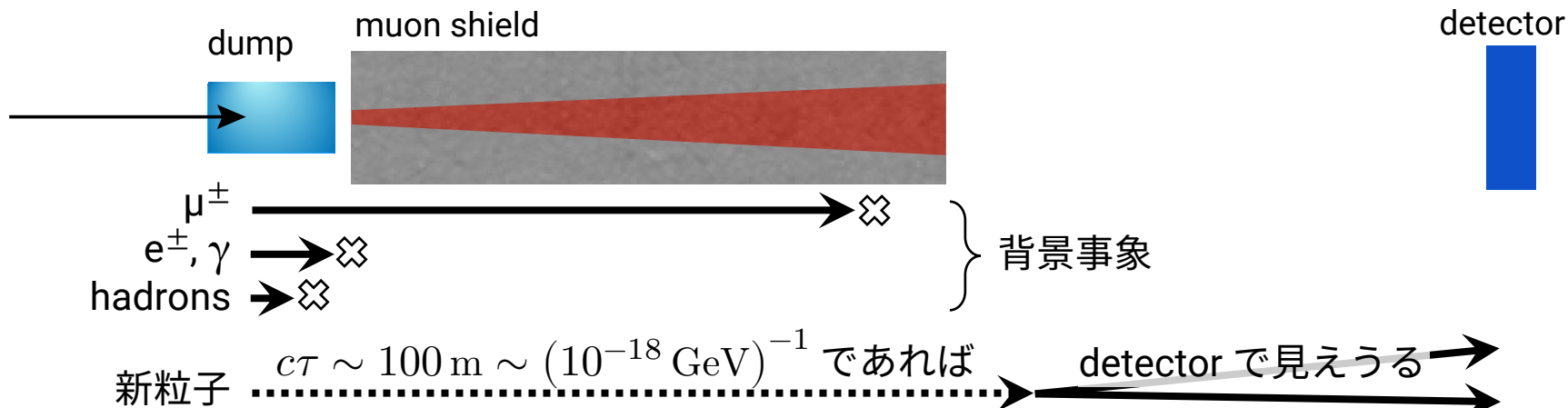
$$E(z) \sim E_0 e^{-\rho z / X_0}$$

$$X_0 \sim 100 \text{ g/cm}^2 \frac{A}{Z^2}$$

■ 『beam と固定標的』ではなく 『shower と固定標的』の散乱



■ 遮蔽を通過する長寿命粒子のみ探索可能 = 背景事象は僅か



- 目標：新粒子があった場合に検出器で何 event 検出できる？

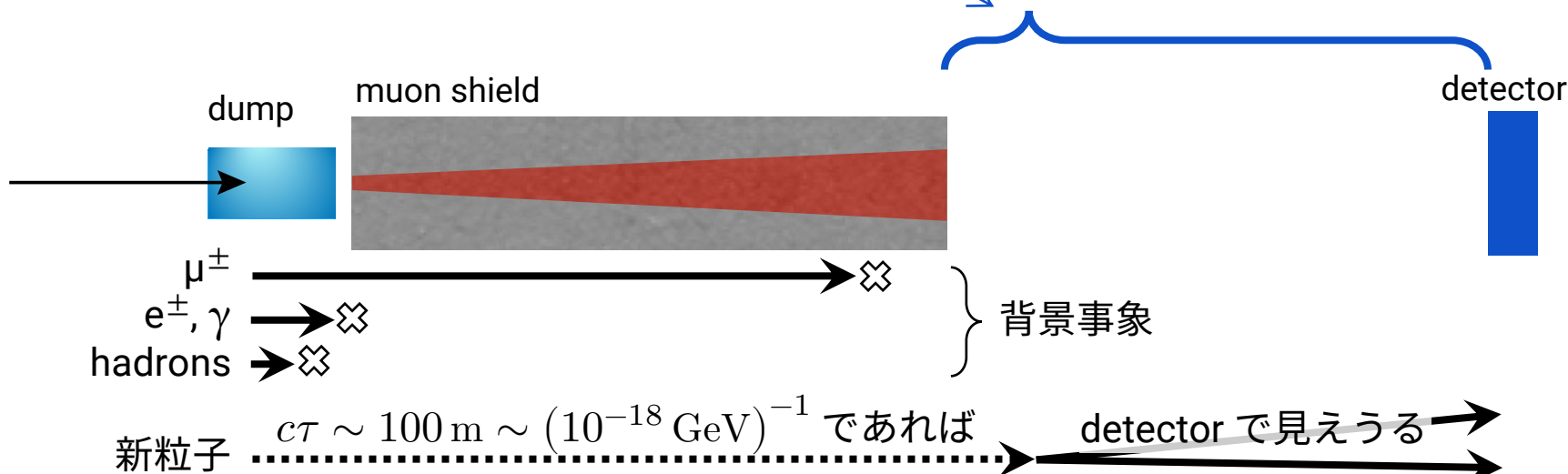
$$N_{\text{signal}} = N_{\text{production}} \times \text{Acc} \times \mathcal{E}$$

新粒子の生成数
受容率
検出器の効率

||

今回は
 $\mathcal{E} = 1$

新粒子が ①この範囲で ②検出可能粒子に崩壊し、
さらにその粒子 (のどれか) が ③検出器の外にそれない 確率



■ 受容率 Acc を計算する

- Monte Carlo simulation をやりたかったが、労力が無駄にかかりそうだったので
- えいやで計算

新粒子が ①この範囲で ②検出可能粒子に 崩壊し、
さらにその粒子（のどれか）が ③検出器の外にそれない 確率

$$\text{Acc}(X) = \int_0^{l_{\text{dec}}} dz \frac{dP_{\text{dec}}}{dz} \cdot \Theta(r_{\text{det}} - r_{\perp})$$

①崩壊位置条件 ③角度条件

(②は今回のモデルでは 100%)

$$\frac{dP_{\text{dec}}}{dz} = \frac{1}{l_X^{(\text{lab})}} \exp\left(-\frac{l_{\text{dump}} + l_{\text{sh}} + z}{l_X^{(\text{lab})}}\right) \quad (\text{位置 } z \text{ での崩壊率}) \quad l_X^{(\text{lab})} = \frac{p_X}{m_X} \frac{1}{\Gamma_X} \quad (\text{新粒子の飛程})$$

$$r_{\perp} = \sqrt{\theta_1^2(l_{\text{dump}} + l_{\text{sh}} + l_{\text{dec}})^2 + \theta_2^2(l_{\text{dump}} + l_{\text{sh}} + l_{\text{dec}})^2 + \theta_3^2(l_{\text{dec}} - z)^2} \quad (\text{横ずれ距離})$$

■ 新粒子の生成数 $N_{\text{production}}$ を計算する

基本公式

$$\frac{N}{VT} = n_1 n_2 \sigma v$$

単位時空あたりの事象数
= お互いの数密度 $\times \sigma v$

Quiz: 式変形

固定標的用

$$N = N_{\text{inject}} n_{\text{target}} L \sigma$$

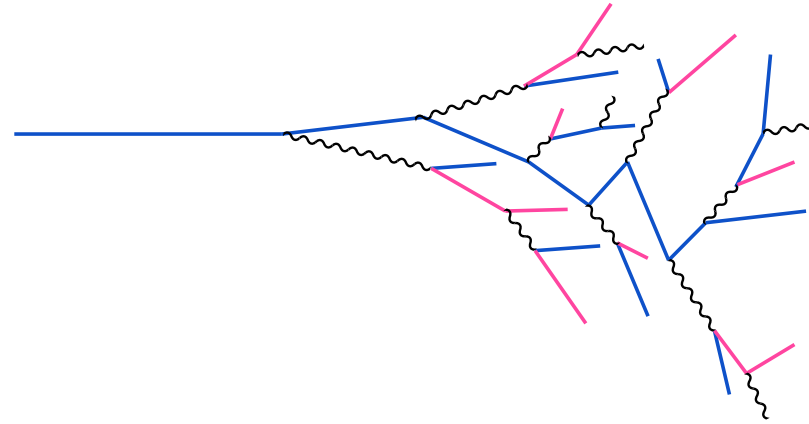
$$N_{\text{inject}} = 4 \times 10^{21} \text{ 個/年 (設計値)}$$

$$n_{\text{target}} = \text{水の [核子 | 電子] 数密度 (知ってる)}$$

$$\sigma = \text{散乱断面積 (理論計算できる)}$$

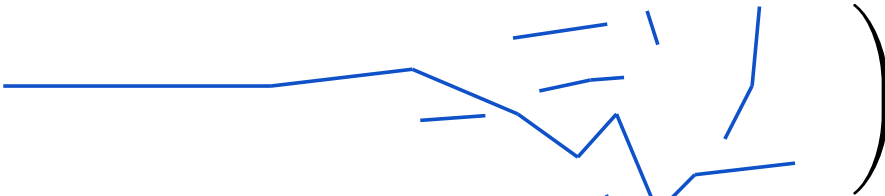
$$L = \text{散乱の生じる長さ} \rightarrow \text{次頁}$$

■ $L =$ 「散乱の生じる長さ」




■ $L =$ 「散乱の生じる長さ」

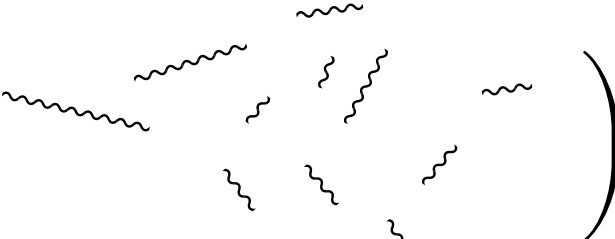
$e^+ N$ 散乱, $e^+ e^-$ 散乱: $\Sigma \left(\text{Diagram} \right)$



$e^- N$ 散乱, $e^- e^-$ 散乱: $\Sigma \left(\text{Diagram} \right)$

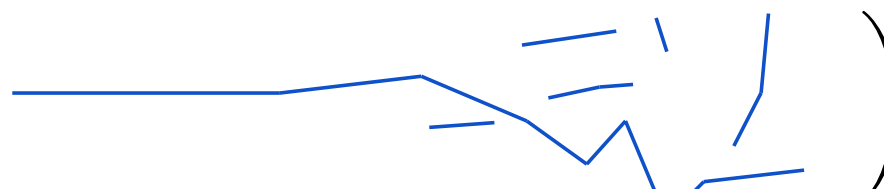


γN 散乱, γe^- 散乱: $\Sigma \left(\text{Diagram} \right)$



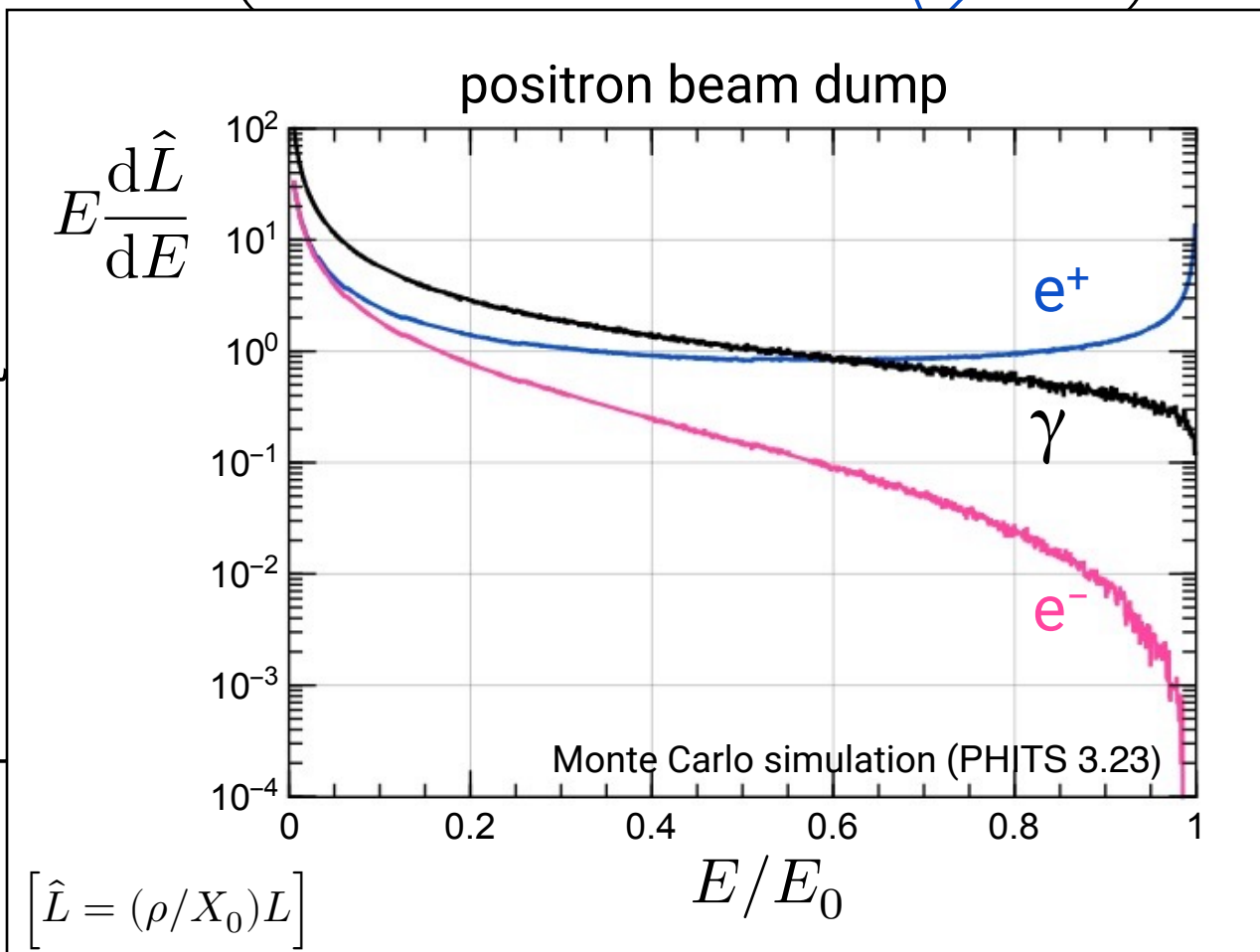
■ $L =$ 「散乱の生じる長さ」

$e^+ N$ 散乱, $e^+ e^-$ 散乱: $\Sigma \left(\text{Diagram} \right)$



$e^- N$ 散乱, $e^- e^-$ 散乱

γN 散乱, γe^- 散乱



生成数の計算 (Dark photon 模型を例として)

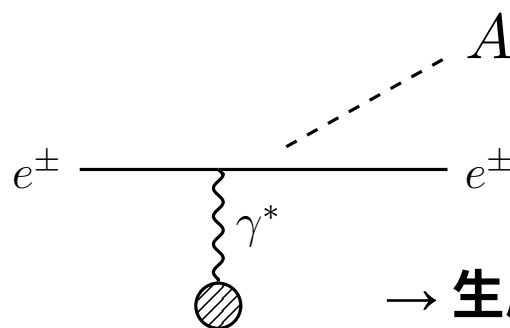
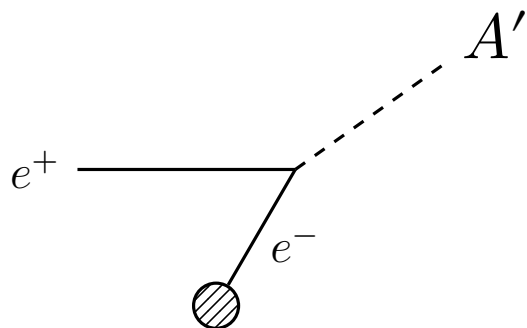
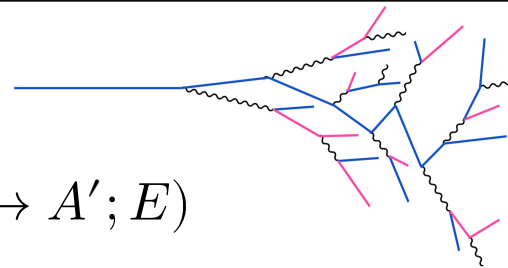
$$N = N_{\text{inject}} n_{\text{target}} L \sigma \quad (\times \text{Acc})$$

$$N(e^+_{\text{shower}} e^- \rightarrow A') = N_{\text{inject}} n_{e^-} \cdot \int dE \frac{dL_{e^+}}{dE} \sigma(e^+ e^- \rightarrow A'; E)$$

$$N(e^+_{\text{shower}} N \rightarrow \gamma N A') = N_{\text{inject}} n_N \cdot \int dE \frac{dL_{e^+}}{dE} \sigma(e^+ N \rightarrow e^+ N A'; E)$$

$$N(e^-_{\text{shower}} N \rightarrow \gamma N A') = N_{\text{inject}} n_N \cdot \int dE \frac{dL_{e^-}}{dE} \sigma(e^- N \rightarrow e^- N A'; E)$$

(\times Acc)

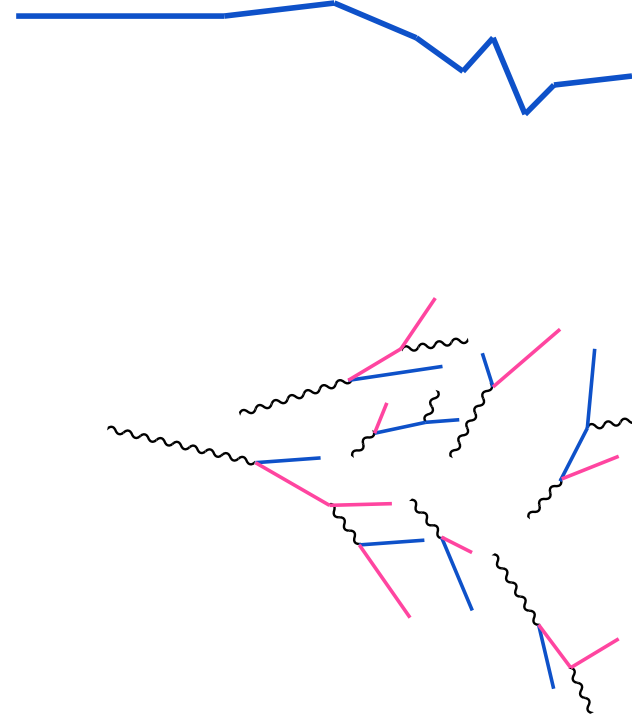
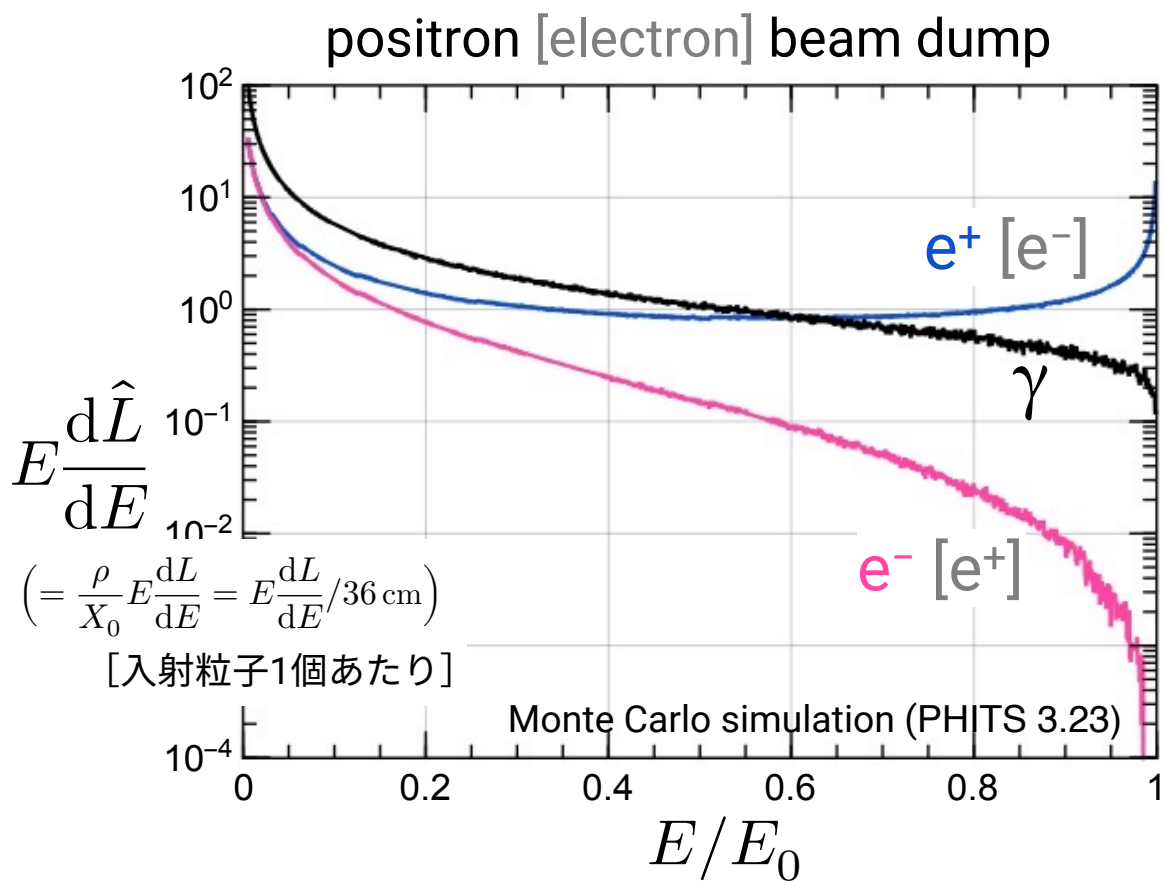


→ 生成数と検出効率がわかったので
検出できる event 数もわかる。

注意

* Acc は shower 粒子の角度 θ にも依存する (つまりホントは $\frac{d^2L}{dE d\theta}$ が要る) が、この研究では MC で求めた平均値で近似した:

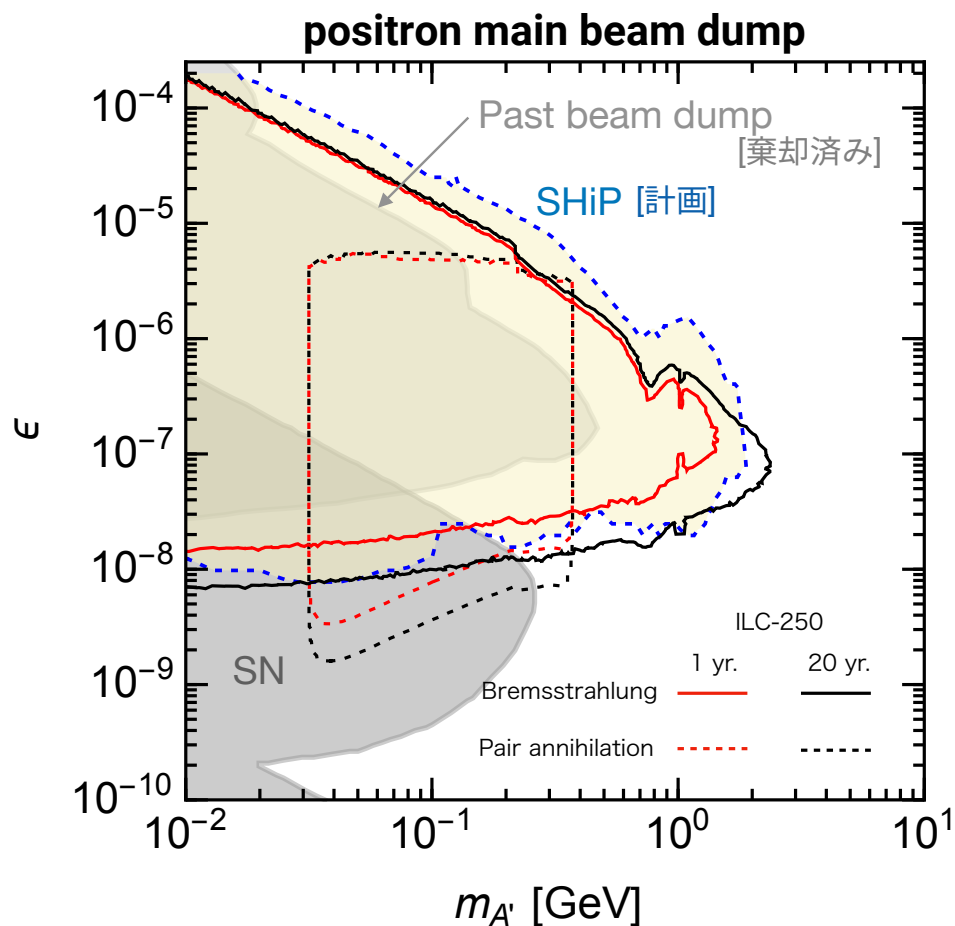
$$\theta \approx \begin{cases} 16 \text{ mrad GeV}/E_{e^\pm} & (e^+, e^-), \\ 8 \text{ mrad GeV}/E_\gamma & (\text{photons}) \end{cases}$$



- Beam 種 (e^- or e^+) に依る寄与と依らない寄与がある。
- 有効長のほとんどは低 energy 側 (主に γ) 。
- 低 energy 側では e^\pm は等しくなる。
- 高 energy 側では beam 粒子が主 (端では峰状) だが, γ もかなり多い。

■ (BKG が無いと近似すれば) $N_{\text{signal}} > 3$ の領域は棄却可能。

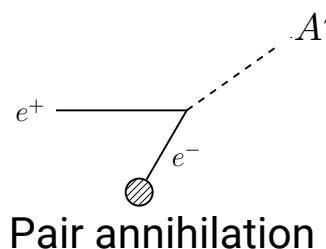
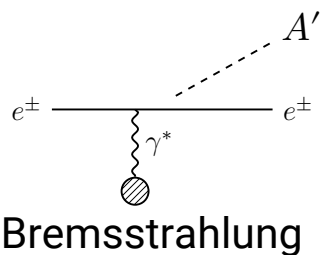
Quiz: どういうこと?



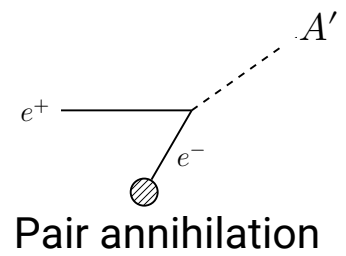
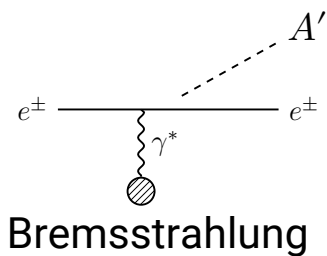
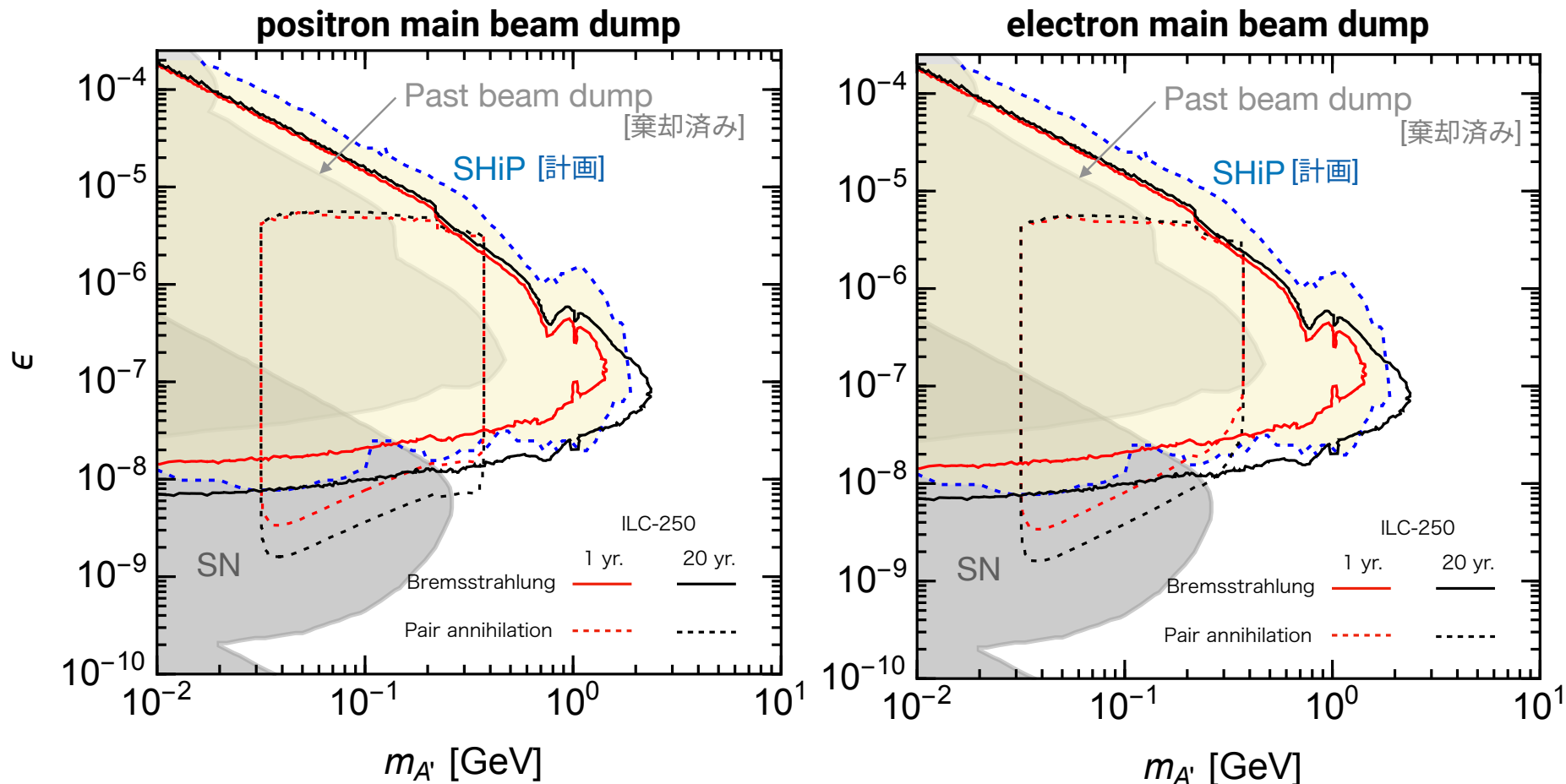
← Dark photon 模型

$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{4} F'^{\mu\nu} F'_{\mu\nu} + \frac{m_{A'}^2}{2} A'^{\mu} A'_{\mu} - \frac{\epsilon}{2} F^{\mu\nu} F'_{\mu\nu}$$

$$\mathcal{L}_{\text{int}} \simeq -\epsilon |e| A'_{\mu} j_{\text{em}}^{\mu}$$

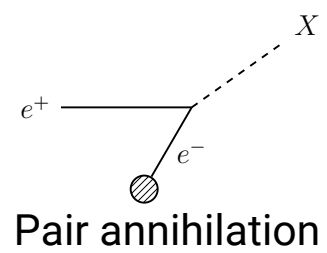
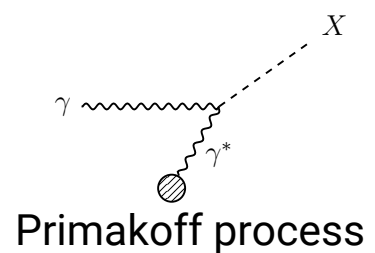
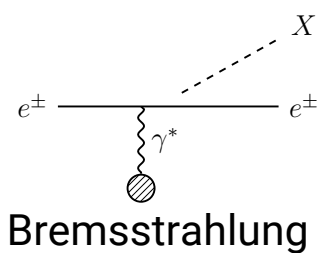
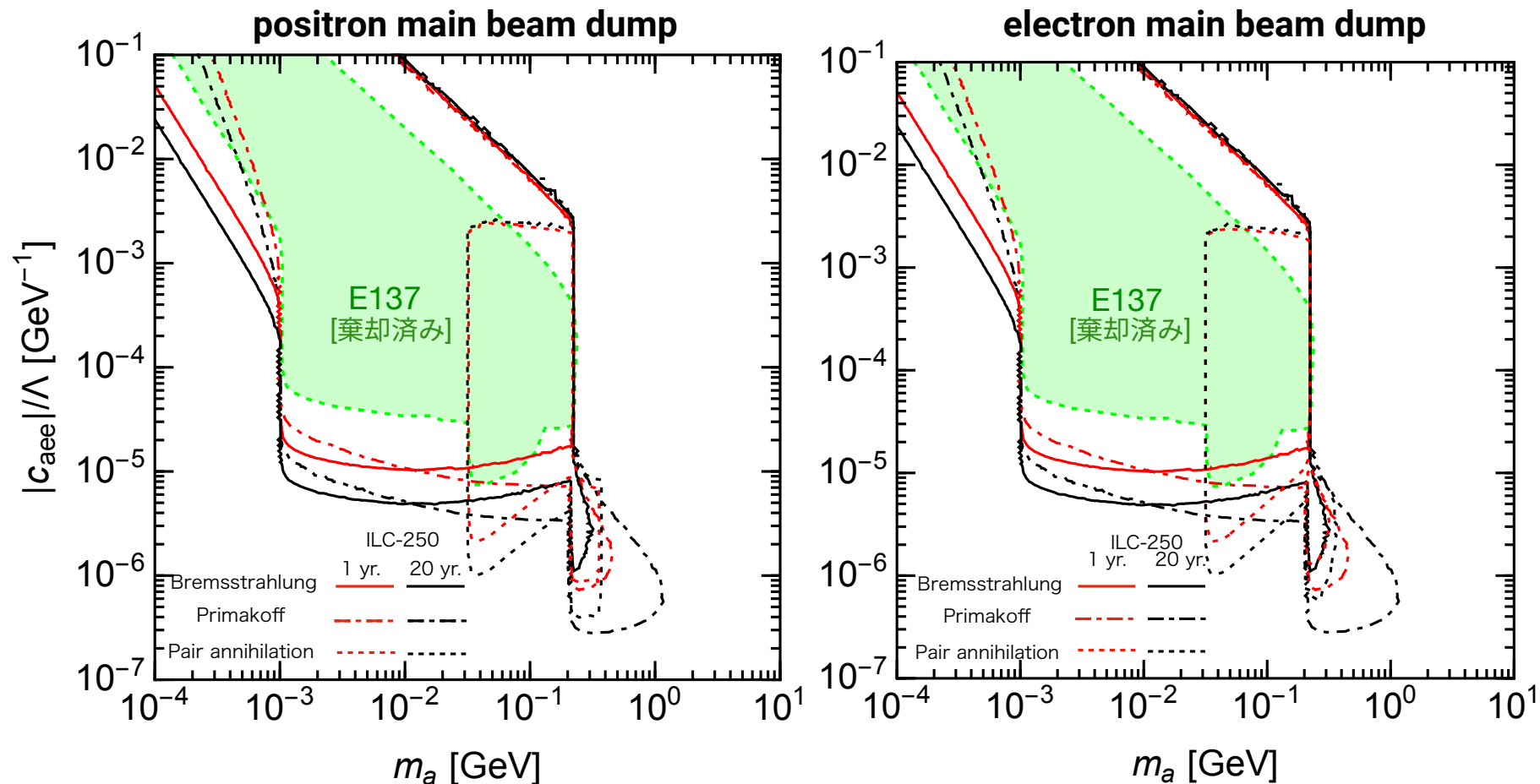


■ 2つの beam dump, どっちが良い？



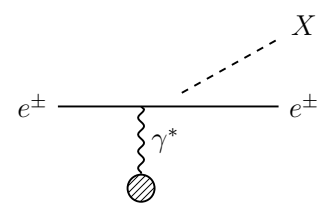
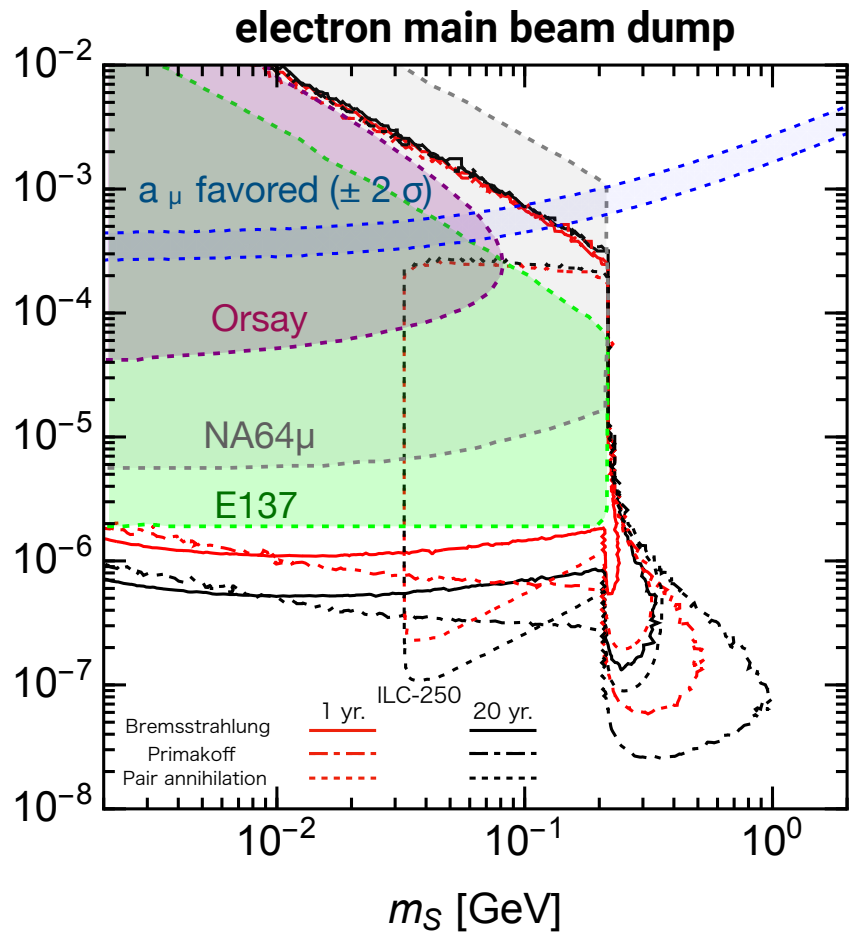
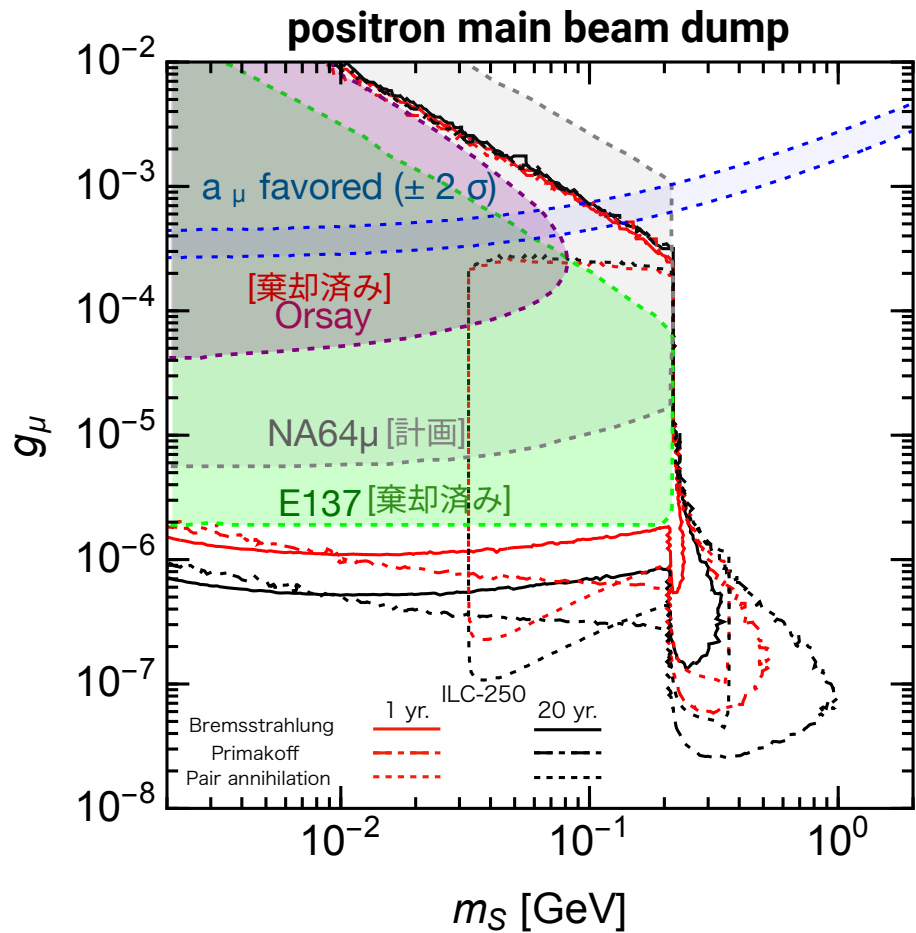
一応、他の模型の解析も..... (Axion-like particle 模型)

$\blacksquare \mathcal{L} \supset \frac{1}{2} \partial_\mu a \partial^\mu a - \frac{1}{2} m_a^2 a^2 + \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \frac{1}{2} \frac{c_{a\ell\ell}}{\Lambda} \partial_\mu a \bar{\ell} \gamma^\mu \gamma_5 \ell - \frac{1}{4} g_{a\gamma\gamma} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}, \quad c_{aee} = c_{a\mu\mu} = c_{a\tau\tau}$

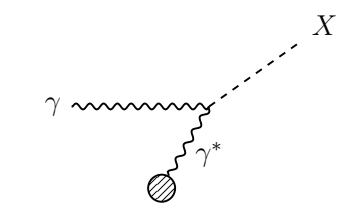


一応、他の模型の解析も.....。 (extra scalar 模型, 質量に比例する結合)

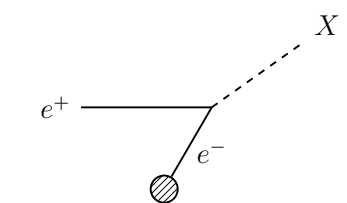
$$\mathcal{L} \supset \frac{1}{2}(\partial_\mu S)^2 - \frac{1}{2}m_S^2 S^2 - \sum_{\ell=e,\mu,\tau} g_\ell S \bar{\ell} \ell - \frac{1}{4}g_{S\gamma\gamma} S F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}, \quad g_\ell \propto m_\ell$$



Bremsstrahlung



Primakoff process



Pair annihilation

1. 導入

- ✓ ILC beam dump での固定標的散乱実験。
- ✓ 固定標的実験の特性。「やや長寿命な軽い新粒子」。

2. 背後の理論

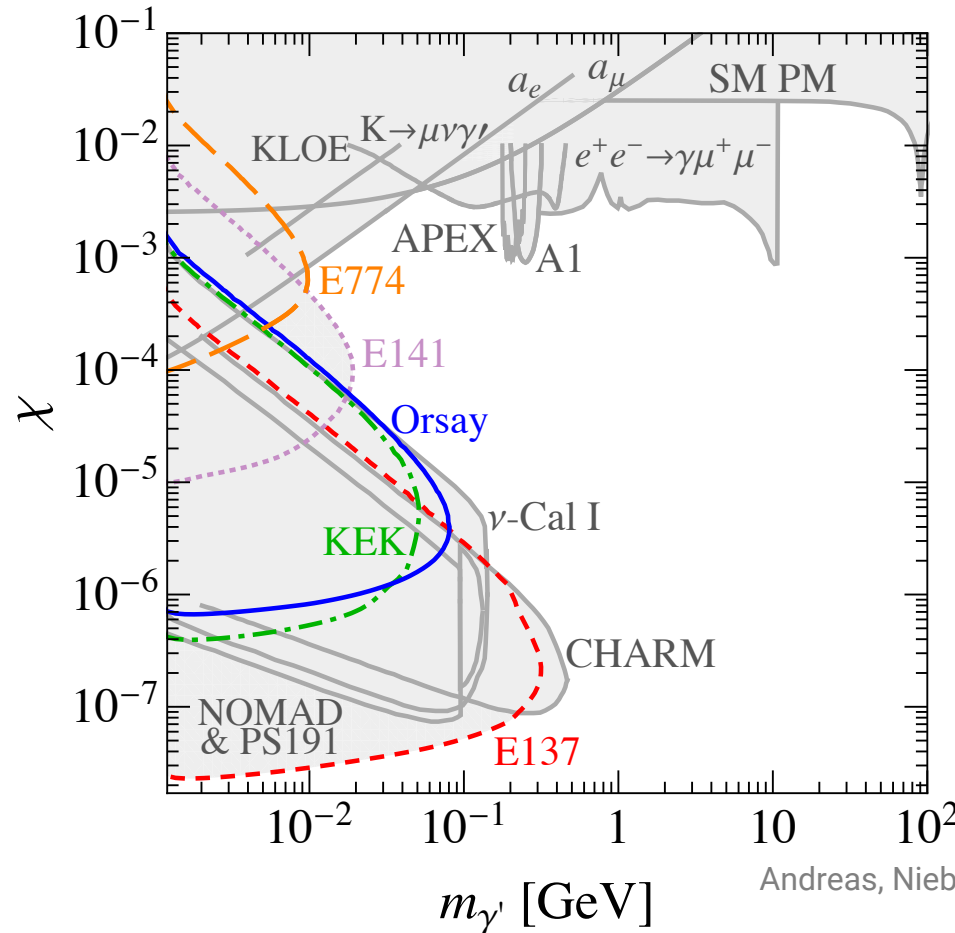
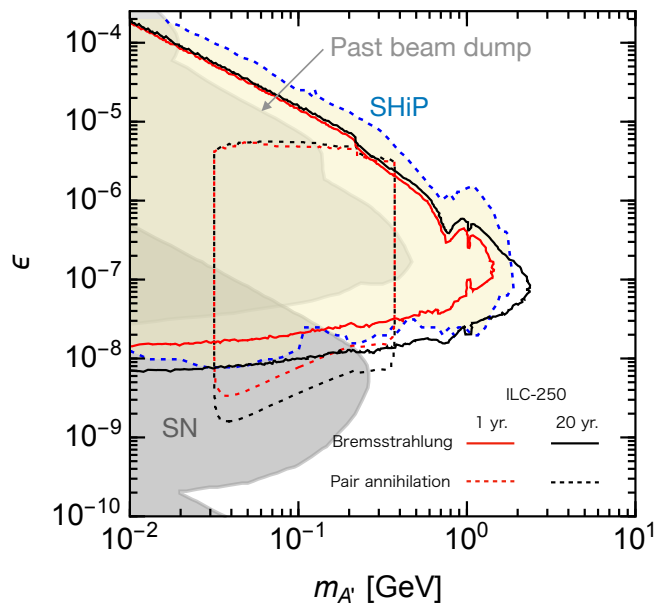
- ✓ Intensity frontier：眼前に茫漠荒寥たり。
- ✓ よく使われる benchmark 模型：Dark photon, ALP, extra scalar。

3. ILC beam dump 実験の特性評価

- ✓ 過去の実験より高性能。
- ✓ 陽電子側の beam dump を使う方が若干良い。（track length の性質のため）

4. さらに詳しく （時間のある限り）

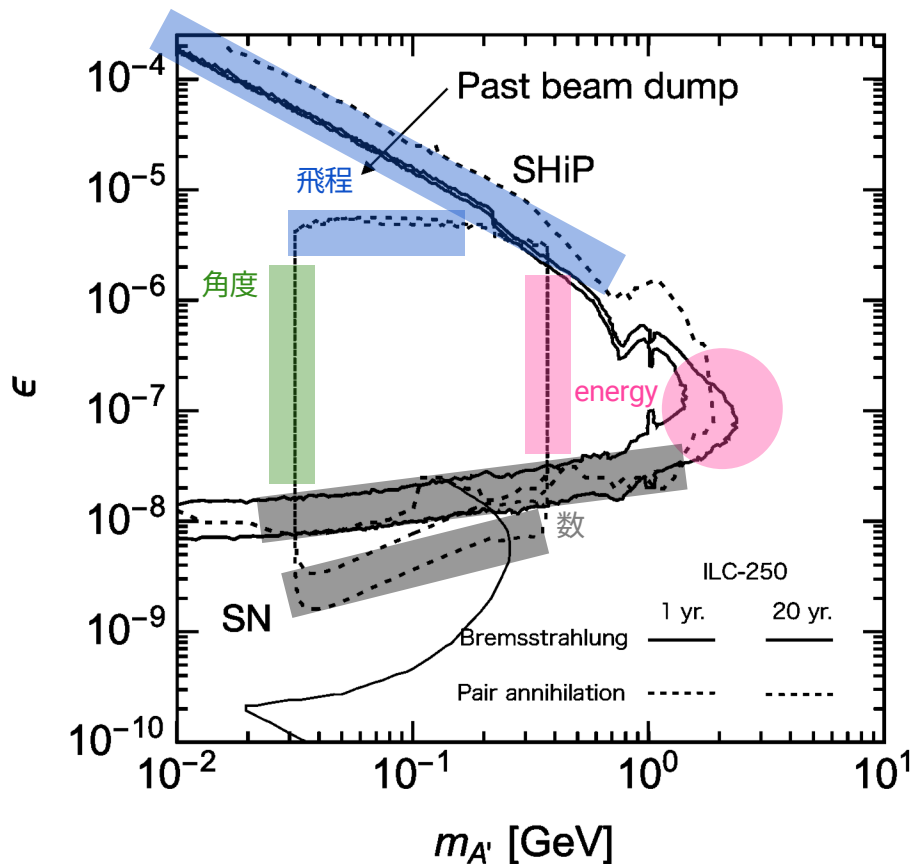
- 感度曲線の形状について，WW 近似，改善できる点



Andreas, Niebuhr, Ringwald [1209.6083]

E774	1991, FNAL	e^- ,	275 GeV,	10^{10} 個,	2 m
E141	1987, SLAC	e^-	9 GeV,	10^{15} 個,	40 m
Orsay	1989, Orsay	e^- ,	1.6 GeV,	10^{16} 個,	3 m
KEK LBDX	1986, KEK	e^- ,	2.5 GeV,	10^{17} 個,	5 m
CHARM II	1991, CERN	p,	450 GeV,	10^{19} 個,	870 m
E137	1988, SLAC	e^- ,	20 GeV,	10^{20} 個,	400 m
ILC beam dump	????, Iwate	e^- / e^+ ,	125 GeV,	10^{21} 個/年,	120 m

感度曲線の物理的解釈



Energy の限界

$$\sqrt{s} \sim m_{A'} < \sqrt{2mE_{\text{beam}}} \approx (360 \text{ MeV}, 15 \text{ GeV})$$

飛程の下限

$$\text{flight} = \frac{p_{A'}}{m_{A'}\Gamma} \gtrsim 70 \text{ m}; \quad \Gamma \approx \frac{\alpha\epsilon^2 m_{A'}}{3}$$

• Pair-annihilation の場合

$$p_{A'} \sim E_{e^+}^{\text{shower}} \sim \frac{m_{A'}^2}{2m_e} \longrightarrow \epsilon \lesssim 10^{-6}$$

• Bremsstrahlung の場合

$$p_{A'} \sim \mathcal{O}(\text{GeV}) \longrightarrow \epsilon m_{A'} \lesssim 10^{-7} \text{ GeV}$$

低 energy の shower 粒子は散らばりがち → 角度条件に引っかかる

$$\bullet r_{\text{perp}} < r_{\text{det}} \iff \theta \lesssim (2 \text{ m}) / (120 \text{ m}) = 1/60$$

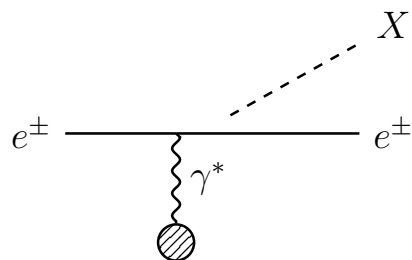
(角度条件が実質的に low-energy threshold になっている)

$$\bullet \text{our approx. } \theta^{-1} \approx (E_{e^\pm} / \text{GeV}) / 0.008 \implies E_{e^\pm} \gtrsim 0.5 \text{ GeV} \implies \sqrt{2m_e E_{e^\pm}} \approx 23 \text{ MeV}$$

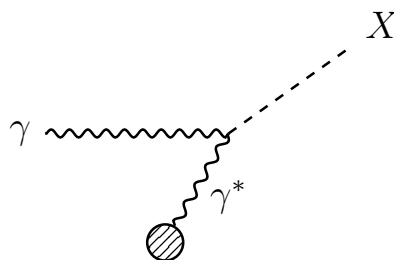
Injection 強度 (と decay volume の長さ)

$$N = N_{\text{inject}} n_{\text{target}} L \sigma \times \text{Acc}$$

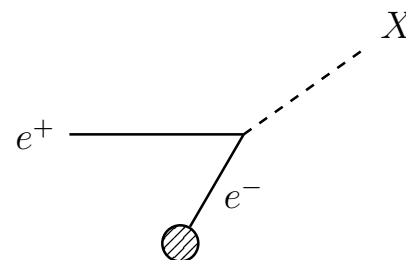
■ 今回考えた過程



Bremsstrahlung



Primakoff process

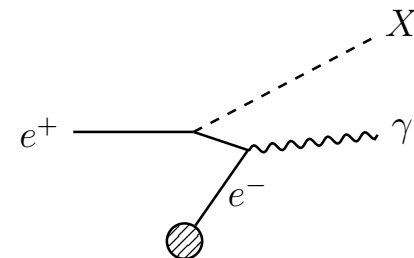
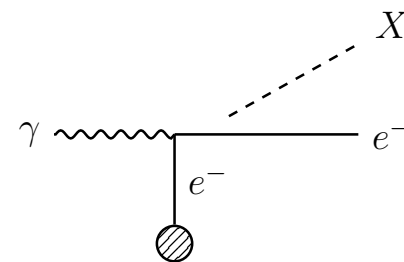


Pair annihilation

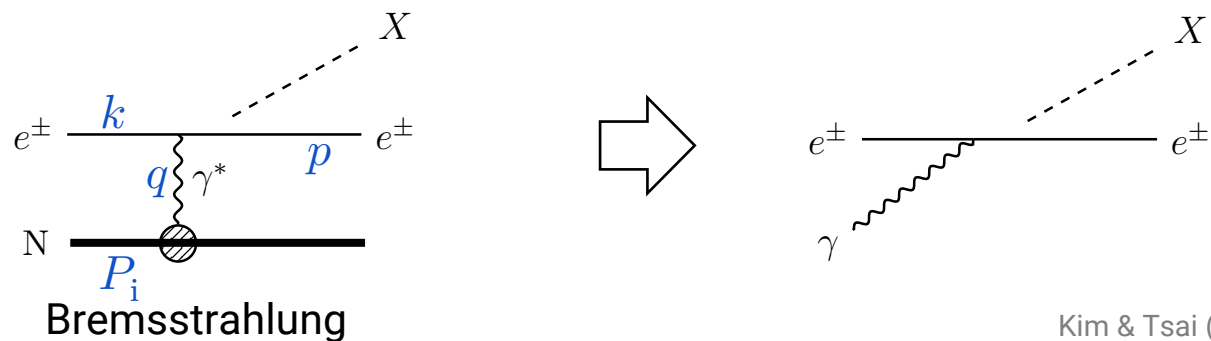
■ 他に生じうる過程 (寄与は小さい)

- Compton photoproduction
 - Pair annihilation 光子マシ
 - Shower 中の μ 粒子からの X の生成
- など.....

(最終的には Monte Carlo によりこれらも加えるべき)



■ 3-body への散乱は面倒：近似を利用



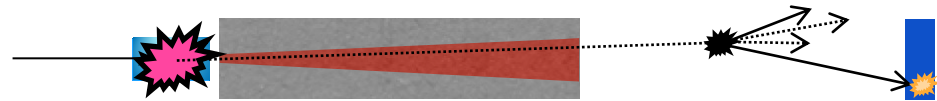
Kim & Tsai (1973), Tsai (1974), Tsai (1986)
 Bjorken, Essig, Philip Schuster, Toro [0906.0580]
 Liu, McKeen, Miller [1609.06781]

Weizsäcker-Williams 近似 (equivalence-photon 近似)

核子からの virtual photon γ^* \Rightarrow photon flux χ で重み付けられた on-shell photon γ

$$\frac{d\sigma_{2\rightarrow 3}}{d(p \cdot k)d(p \cdot P_i)} \approx \frac{\alpha}{\pi} \frac{\chi}{P_i \cdot (k - p)} \frac{d\sigma_{2\rightarrow 2}}{d(p \cdot k)} \Bigg|_{t=t_{\min}}$$

$k \gg m_X, m_e$ の場合に妥当な近似なので、図の右端ではやや不正確。

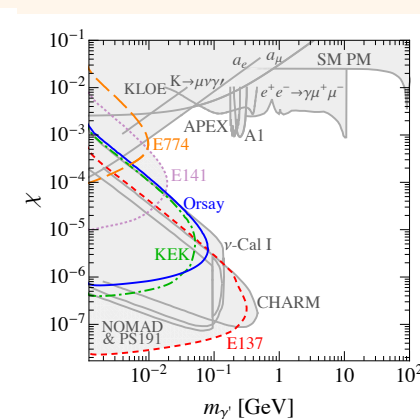
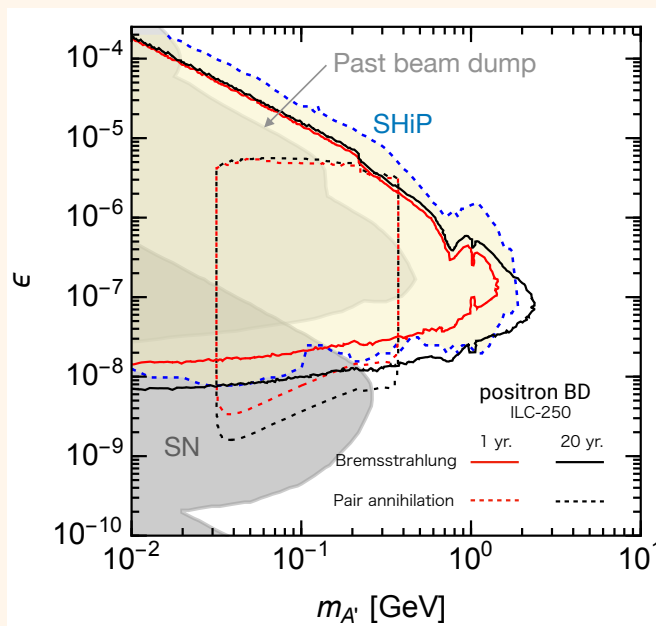


ILC beam dump 固定標的散乱。

- ✓ 「やや長寿命な軽い新粒子」 = intensity frontier
- ✓ 過去の実験より高性能。→ 「スツとできるゴミ利用s」
- ✓ 陽電子側の beam dump を使う方が若干良い。

要点

- ✓ Track length
- ✓ 感度曲線の物理的解釈
- ✓ Weizsäcker-Williams 近似



今後の展望

- (エイヤで決めた shower 角度や Acc ではなく) Monte Carlo simulation すべき
- もっと ILC で何かできないか? (dump は 2 つある)
- Intensity frontier をどう攻める? (オカネよりチ工の問題)