

HEAVY NEUTRAL LEPTONS AT ILC BEAM DUMP EXPERIMENTS

MIHOKO M. NOJIRI (THEORY CENTER KEK)

WITH

Y. SAKAKI (RSC, KEK), TOBIOKA (FLORIDA STATE),
UEDA (CHEP, PEKING) 2206.13523

SEE ALSO

GIFFIN, GORI, TSAI, TUKLER 2206.13745

HEAVY NEUTRAL LEPTONS AT ILC BEAM DUMP EXPERIMENTS

MIHOKO M. NOJIRI (THEORY CENTER, KEK)

WITH

Y. SAKAKI(RSC, KEK), TOBIOKA(FLORIDA STATE),

UEDA(CHEP, PEKING) 2206.13523

SEE ALSO

GIFFIN, GORI, TSAI, TUKLER 2206.13745

トークの流れ

- Heavy Neutral Lepton (Right Hand Neutrino) について 相互作用の特徴
- ILC e^+e^- collider at $\sqrt{s} = 250$ GeV \rightarrow beam dump 実験
- beam dump 中でのビームの発展 イベント数を計算する上で必要な要素
- 他の実験計画との比較
- もう少しやらないといけないこと (反省点)

HEAVY NEUTRAL LEPTON について

- 相互作用

$$\mathcal{L} = -\lambda_{eI}(\bar{L}_e \tilde{H})N_I - \frac{1}{2}M_I \bar{N}_I^c N_I + \text{h.c.},$$

- neutrino mass matrix $m_{\nu, ll'} = \sum_I \lambda_{lI} \lambda_{l'I} v^2 / M_I$

- ニュートリノと HNL 混合

$$U_{eI} = \frac{v \lambda_{eI}}{M_I} : \text{ニュートリノが生成されるところにはどこでも HNL が生成されうる。}$$

(cross section, Br はニュートリノ \rightarrow N に置き換えて U^2 をかけたもの)

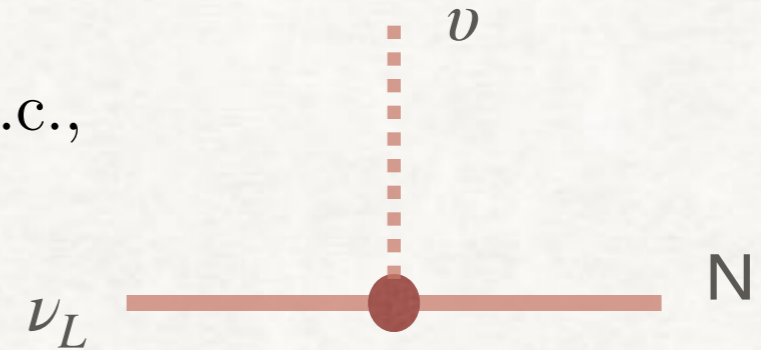
- Motivation: (ν MSSM)

ダークマター

バリオン数生成 (N の振動 \rightarrow レプトン数生成 \rightarrow バリオン数)

Akhmedev, Rubakov and Smirnov

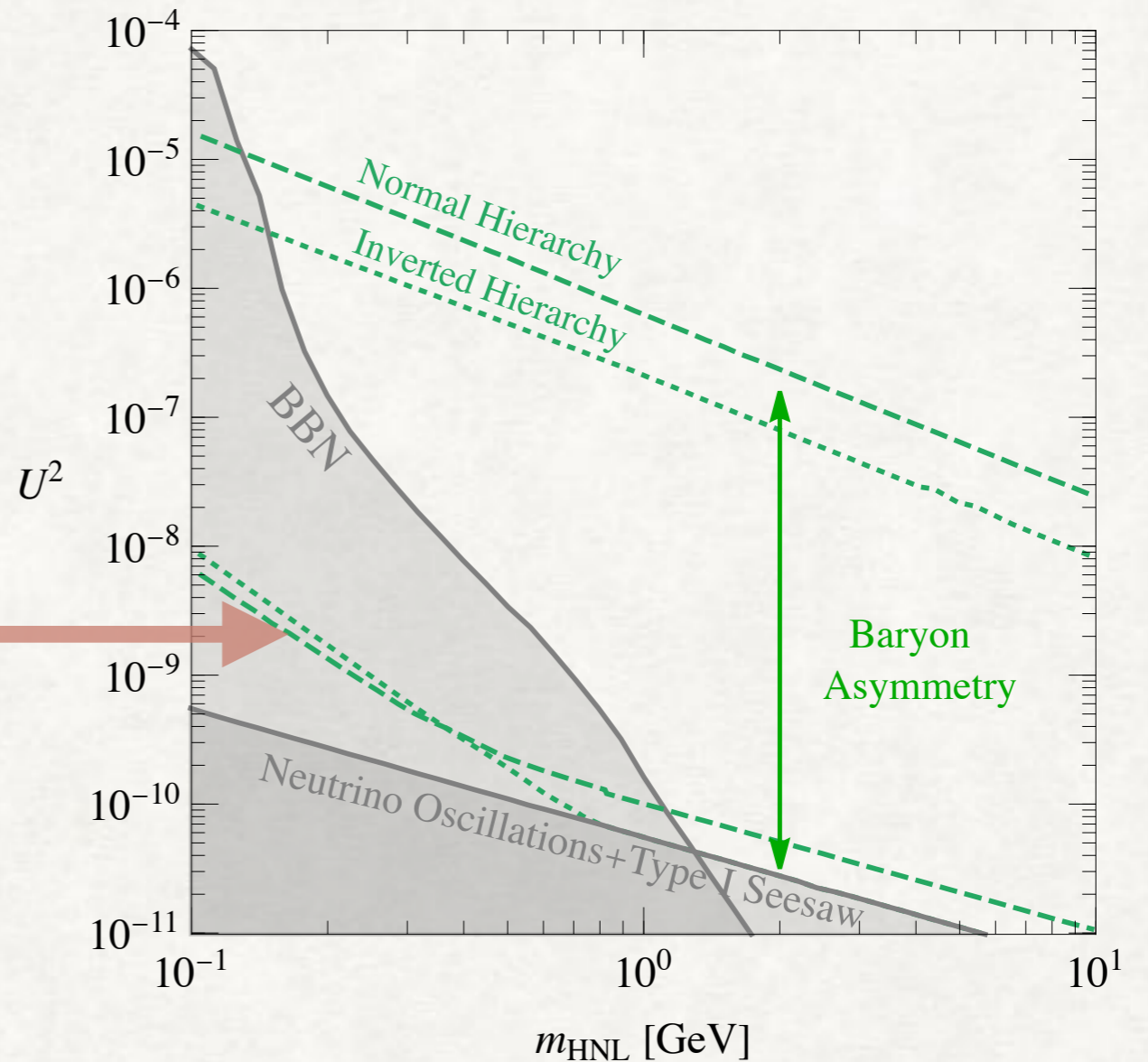
T. Asaka and M. Shaposhnikov, The ν MSSM, dark matter and baryon asymmetry of the universe, Phys. Lett. B 620 (2005) 17–26



興味のあるパラメータ

宇宙論からの制限(mixing の下限)

Life time に対する制限：
元素生成後に崩壊



(多少アドホックなパラメータチョイスだが)

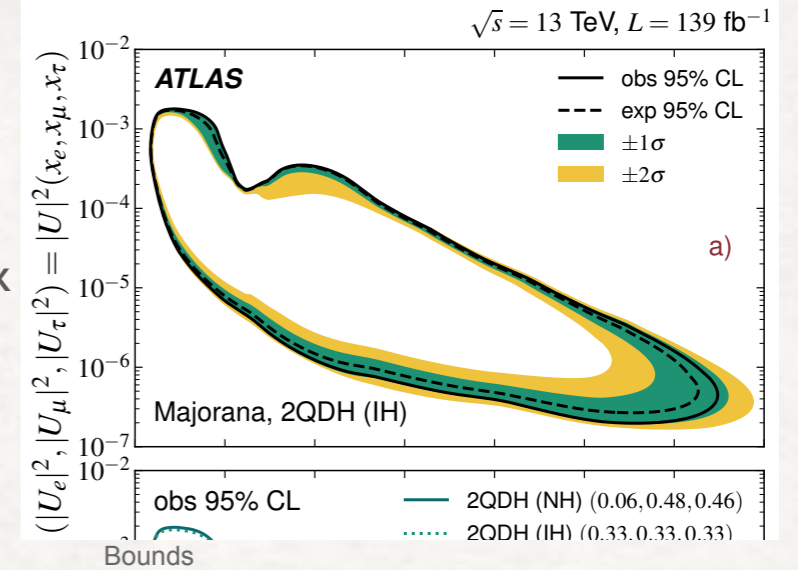
宇宙のバリオン数は「縮退しているHeavy lepton」があると

説明することができる $M_{N_2} \sim M_{N_3}$

plot from Dark Matter, Baryogenesis and Neutrino Oscillations
from Right Handed Neutrinos PRD Phys.Rev.D 87 (2013) 093006

Current Heavy Neutral Lepton Search

ATLAS 2204.11988 CMS
dilepton displaced vertex
from W decay



最近でも新しい探索が行われている分野

N62 experiment 2005.09575
 $K^+ \rightarrow e^+ N$ search

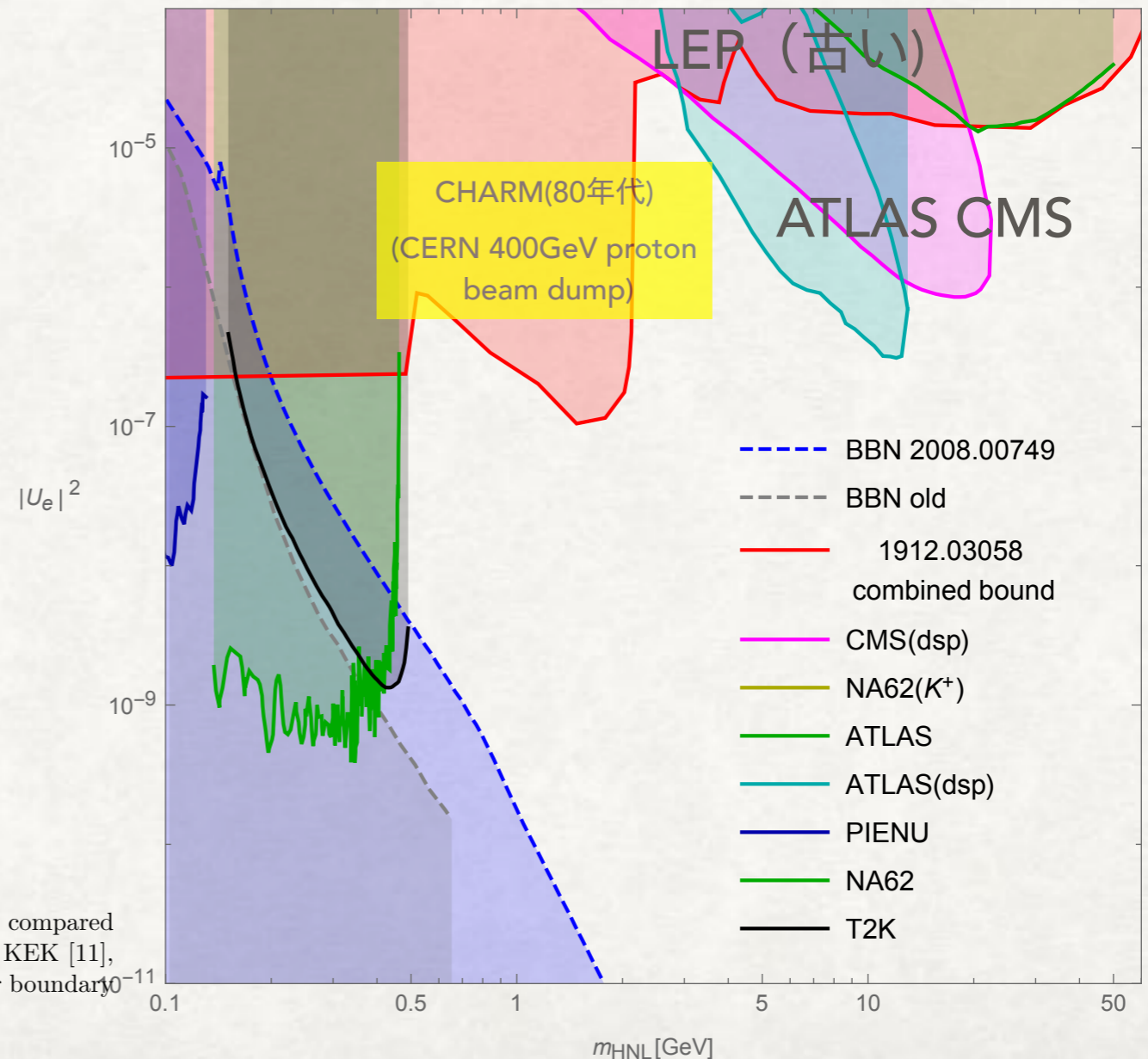
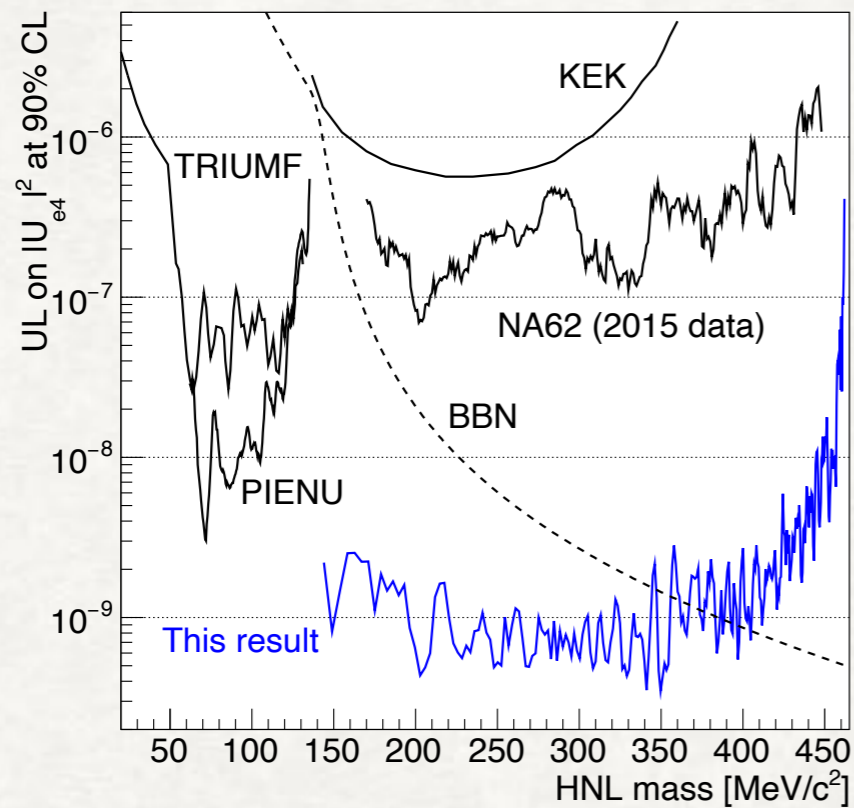


Figure 6: Upper limits at 90% CL of $|U_{e4}|^2$ obtained for each assumed HNL mass compared to the limits established by earlier HNL production searches in $K^+ \rightarrow e^+ N$ decays: KEK [11], NA62 (2015 data) [9]; and $\pi^+ \rightarrow e^+ N$ decays: TRIUMF [12], PIENU [13]. The lower boundary on $|U_{e4}|^2$ imposed by the BBN constraint [14] is shown by a dashed line.

加速器実験での LLPの探索

加速器の構成

- * Injection
- * 加速
- * 衝突点 (高いエネルギー衝突)
- * beam dump (proton or electron)

beam dump (ビームのゴミ箱)

円形加速器: ビームが広がったり、
それたりした時に、
放棄する場所

線形加速器: 毎回捨てる

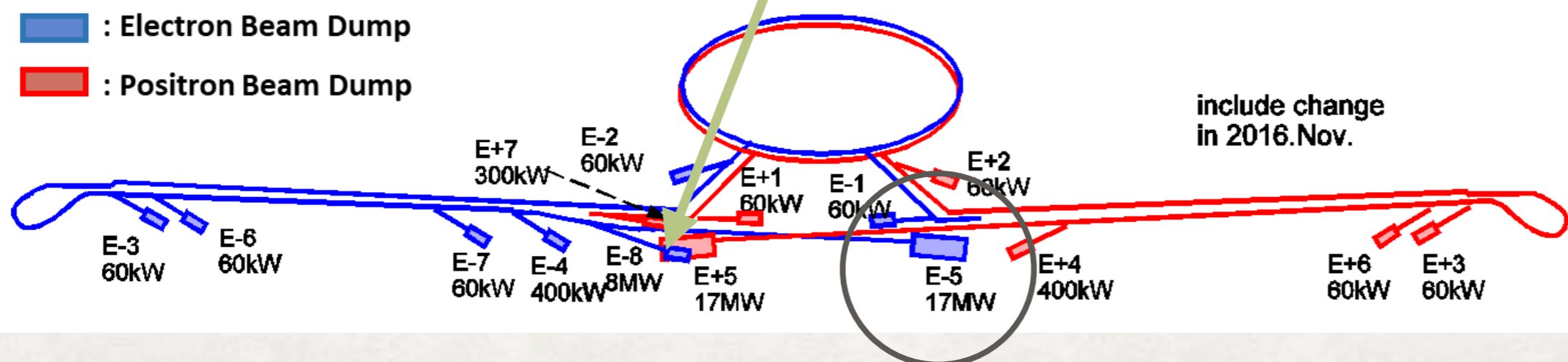
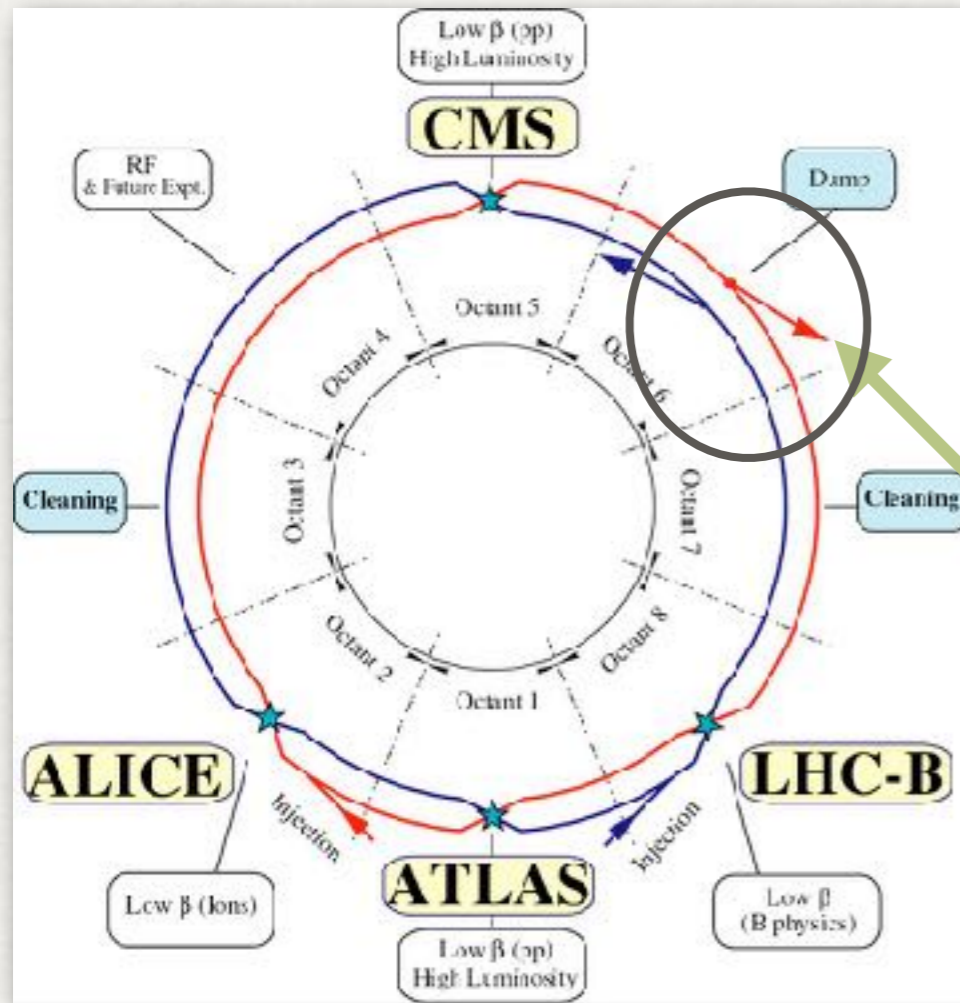


Fig.9 ILC レイアウトとビームダンプの配置

(E+5, E-5 がメインビームダンプであり、17MW は将来の Upgrade を考慮した値である。)

ILC BEAM DUMP

メインビームダンプ 俯瞰図

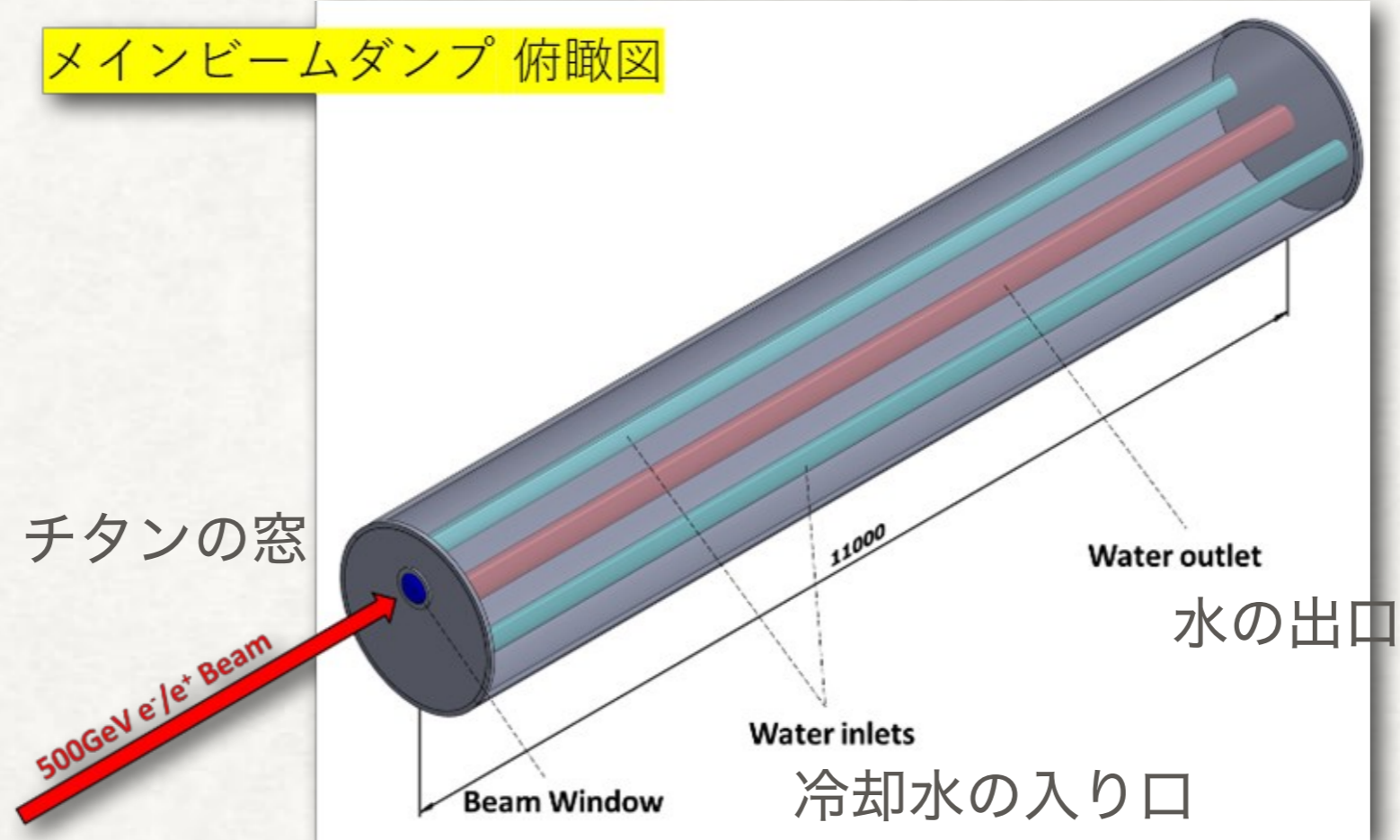


Fig.15 メインビームダンプの外形

$$2.6\text{MW } N_{EOT} = 4 \times 10^{21}/\text{year} \\ (14\text{MW FOR } 500\text{GEV})$$

LHCのfix target 実験 (SHiP) では $N_{POT} = 2 \times 10^{20}/(5\text{years})$ を仮定

ILC はどんどん捨てているので、粒子数はすごく多い

HEAVY NEUTRAL LEPTONの探索実験の概略

ビームダンプ 11m

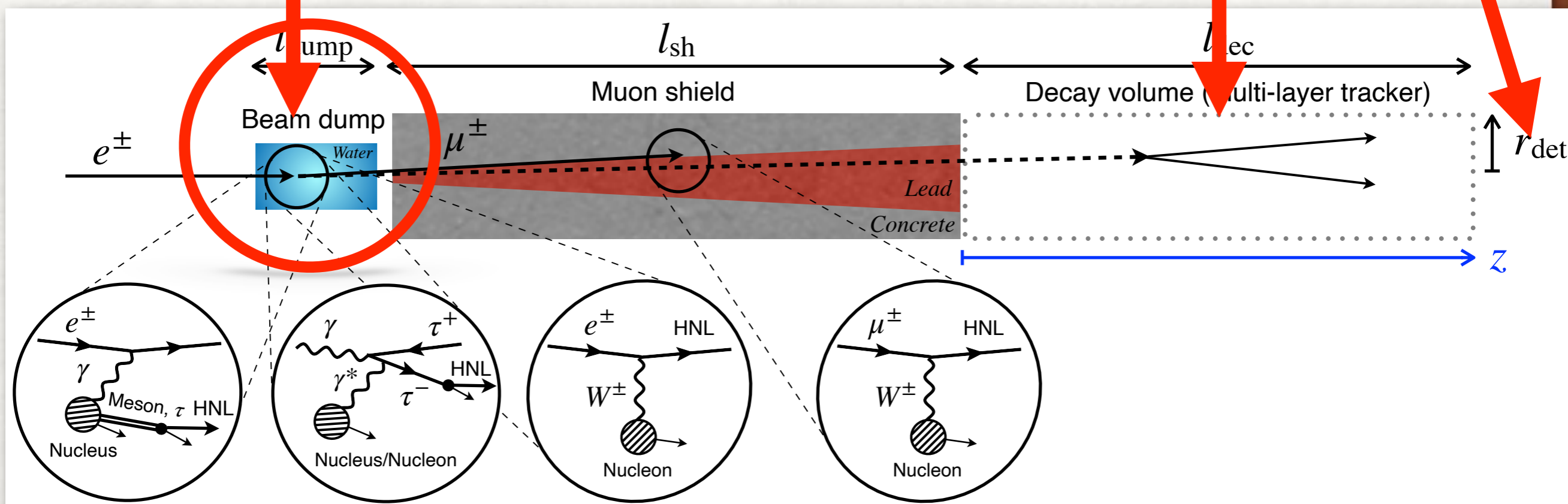
HNL の生成

崩壊領域 50m

測定器 直径3m

ミュオンシールド 70m

バックグラウンドとなる粒子を
できるだけ除く



[PARTICLE FLOW]

- 知りたい量 **N の生成数と運動量**(N の飛ぶ長さの決定に重要)
- 電子ビームがbeam dump のなかでどのように発展するか
- EM shower → e, μ , τ , γ
 - 特徴 electron のエネルギーが高いため、photon等のエネルギーもそれなりに大きい。
- (e, γ)-N interaction → hadrons → weak decay するハドロン
- **粒子のエネルギー減衰**(物質と粒子の相互作用)

ビームダンプ中での電子、光子の「有効トラック長」

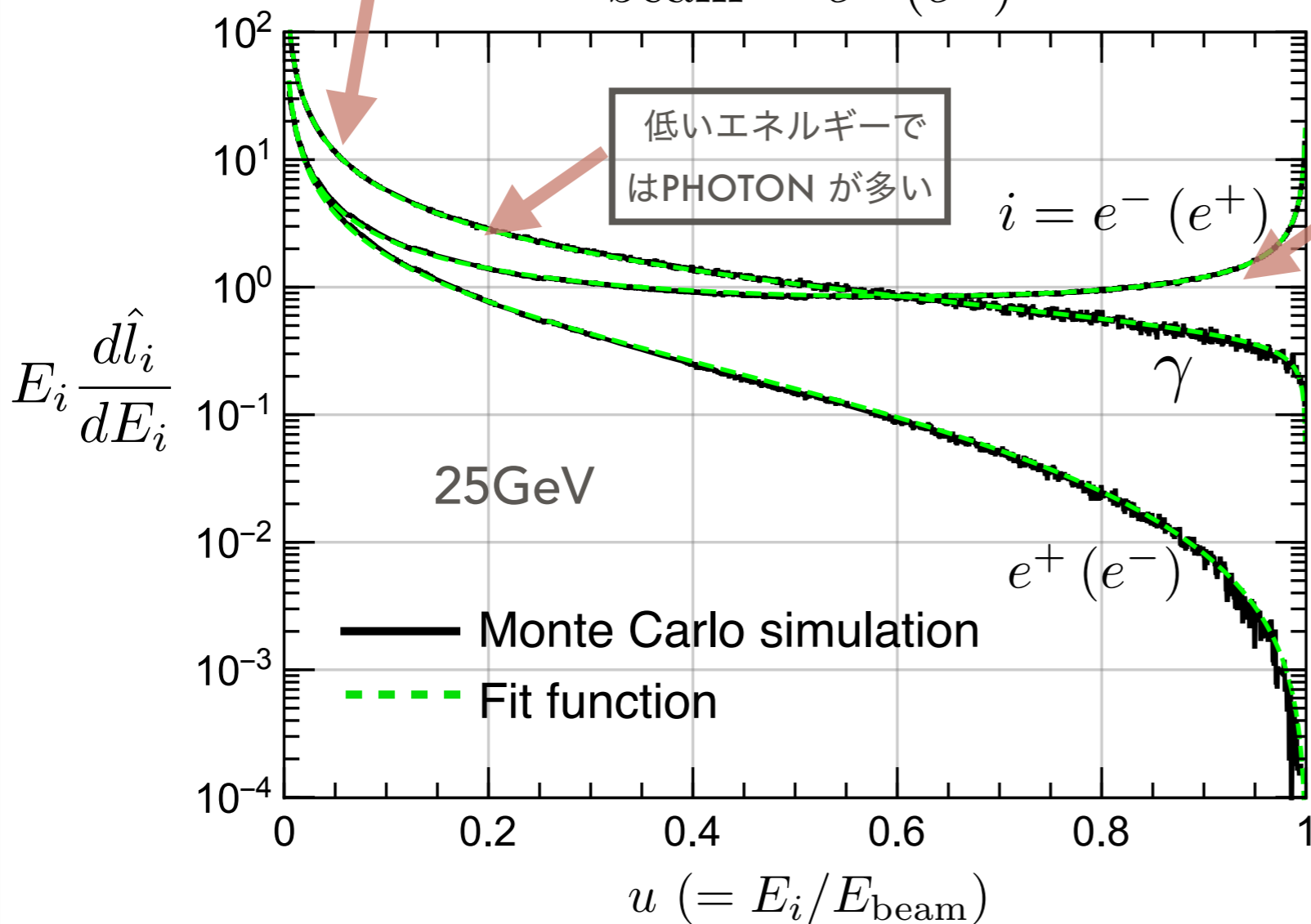
$\frac{d\ell}{dE}$: differential track length 入射粒子から生成された粒子が、

Energy E をもって、物質中をとおる長さ(どれだけのターゲット粒子を見るかを表す)

electron だけではなく e^\pm, γ, μ^\pm の混合物

エネルギーが低い粒子は
たくさんいる

beam = $e^- (e^+)$



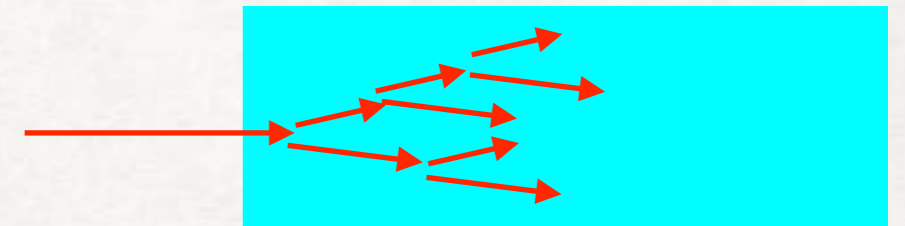
低いエネルギーで
はPHOTONが多い

$i = e^- (e^+)$

γ

$e^+ (e^-)$

11m (100rad length)



入射電子の寄与

e, γ
はほぼ吸収

入射粒子の反粒子は、
PHOTON を経由してくるので、
エネルギーが低い

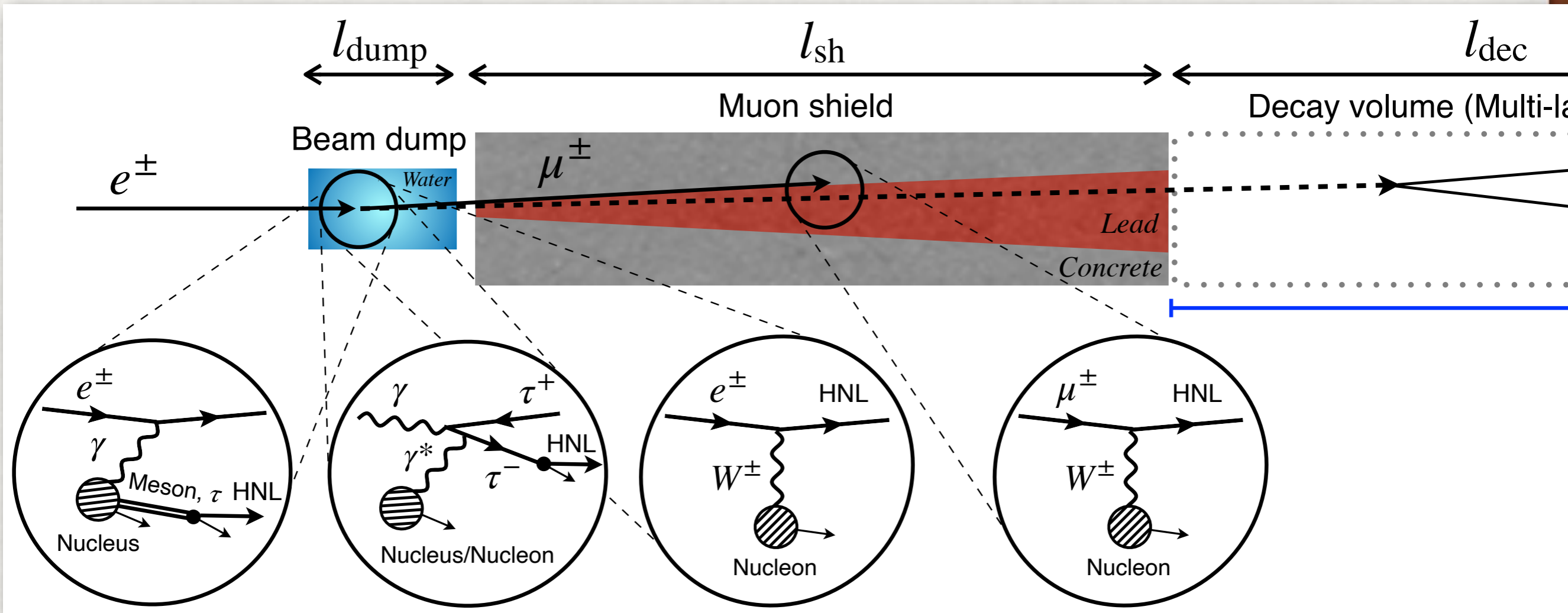
ArXiv 2105.13768

Asai, Iwamoto, Sakaki, Takubo

HEAVY NEUTRAL LEPTONの生成

生成

1. レプトン → Heavy neutral lepton (direct production by charged current)
2. 重い粒子 (Meson tau などの崩壊)



ハドロン
SEMI-LEPTONIC 崩壊

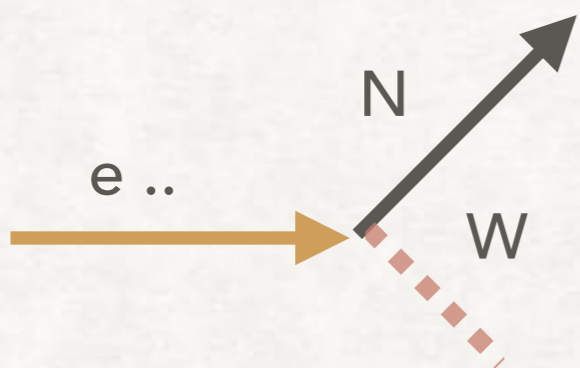
LEPTON の
崩壊から

直接生成

DIRECT PRODUCTION SIGNAL

生成断面積はUによる

$$\bullet N_{\text{signal}} = N_{EOT} \sum_{i=e^\pm, \mu^\pm \dots} \int dE_i \frac{d\ell_i}{dE_i} n_{\text{nucl}} \sum_{f=n,p} \int d\Pi \frac{d\sigma(if \rightarrow NX)}{d\Pi}$$



$$\times Br_{\text{vis}} Acc_{\text{dump}}(N)$$

どういうfinal 粒子ができるかは

Uによる(今は $\nu_{e,\mu,\tau}$ のどれかに混ざっている
とする)

Life time はUに依存

decay volume への届きかた
をコントロール

ハドロン生成→N の評価

$$\frac{dN_k}{dE_k} = \int dE_\gamma \frac{dl_\gamma}{dE_\gamma} \times n_{\text{nucleus}} \times \int d\Pi_X \frac{d\sigma_{\gamma \text{ nucleus} \rightarrow kX}}{dE_k d\Pi_X}$$

解析的に計算できない

$\sigma(\gamma N \rightarrow \text{hadron})$ (PHITS PYTHIA など)

+hadron と物質相互作用(PHITS)

PHITS: KEKで開発 医療用 適宜GEANT と比較

(K meson くらいまで)

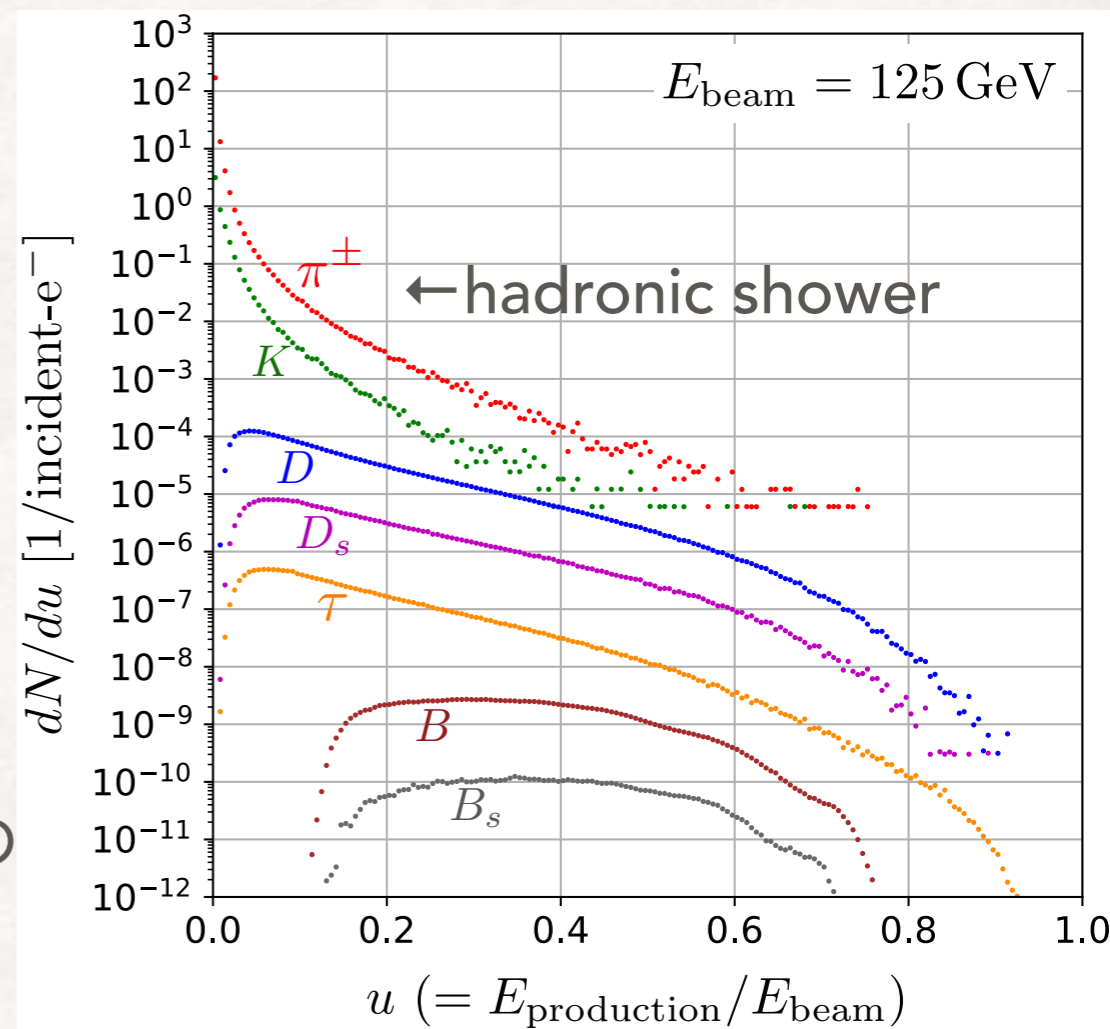
pythia: D B の生成を評価するのに利用

*decay からN が生成される可能性がある。

* $U_{3N}(\nu_\tau - N \text{ 混合})$ を測定するためには τ の

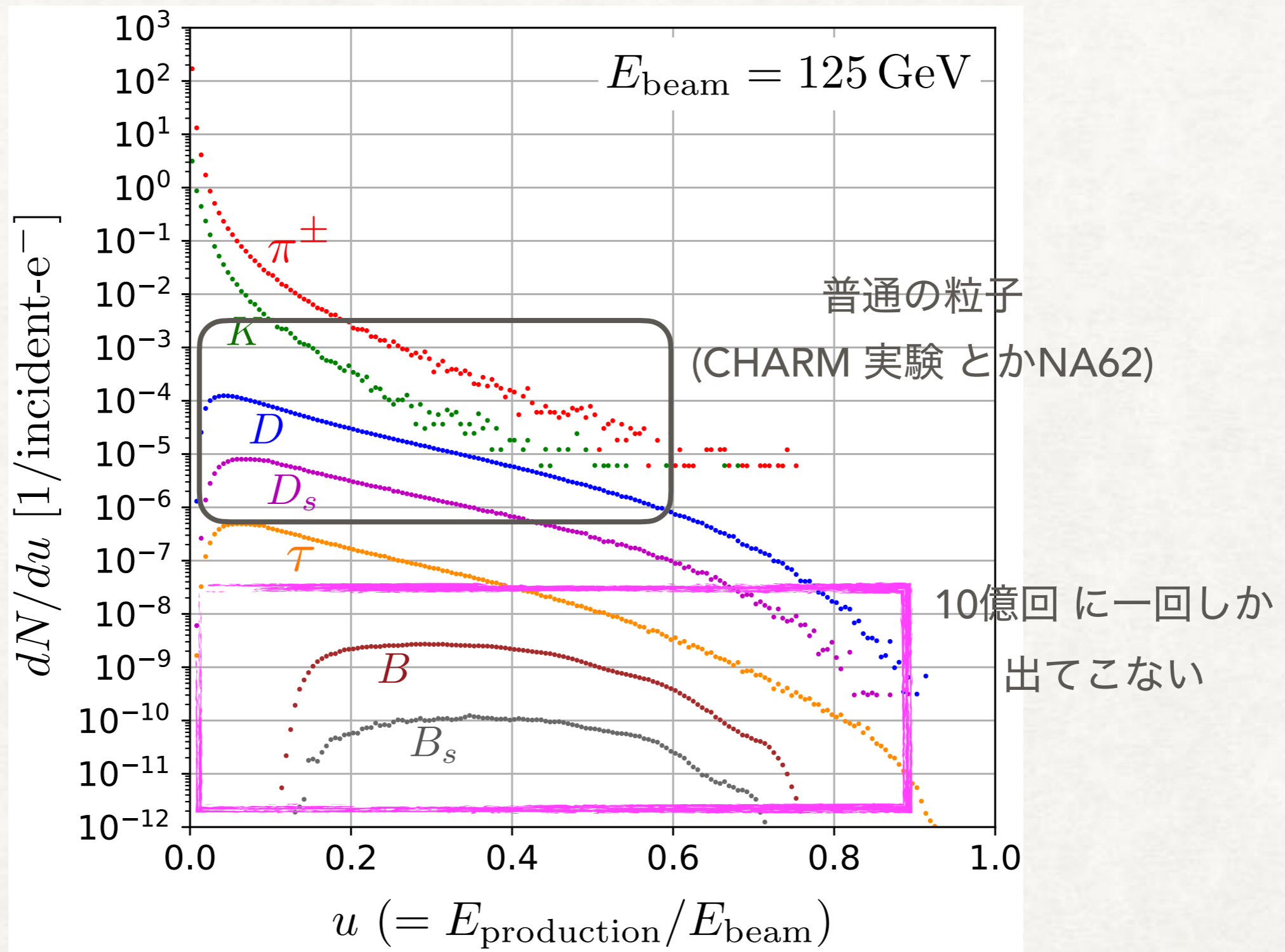
生成が必要 $D_s(cs) \rightarrow \tau$ (分岐比 5%)

$\gamma N \rightarrow \tau\tau X$ は PHITS を拡張



$2.6 \text{ MW } N_{EOT} = 4 \times 10^{21} / \text{year}$
(14MW FOR 500GEV)

少数統計についての注意

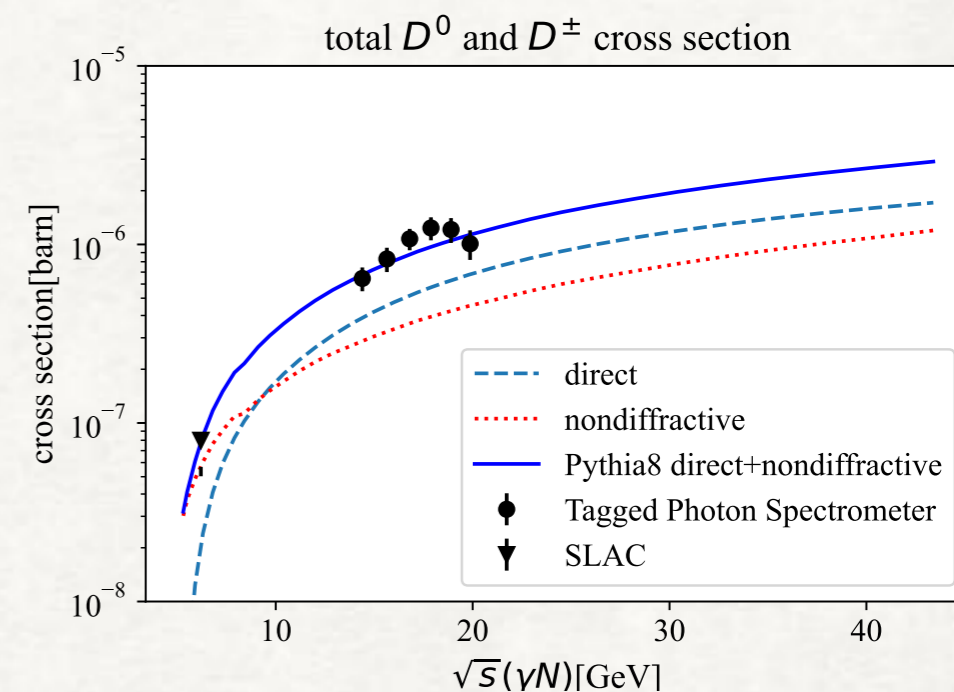


B 粒子についてはシミュレーションでの生成の頻度を実際よりも上げ、
その事象に低い存在確率 $w \ll 1$ を割り当てる

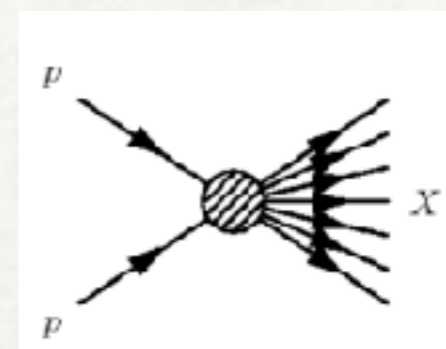
PYTHIA でのD, B 生成の評価

- PYTHIA 非常に古くからある、事象生成プログラム
- 様々な素粒子実験（初期状態）に対応
- 重心系のcross section のデータテーブルを作り、それをローレンツブーストして原子核の静止系での断面積を求めて、PYITS に組み込む
- PYTHIA は γ N の原子核の実験データ（重心系エネルギーで20GeV くらいまで）のデータを再現

- 低エネルギー: non-diffractive 相互作用(非摂動的な相互作用→実験データが必要)
- 高いエネルギー: parton-photon の相互作用



non-diffractive(空間的に均等に分布)

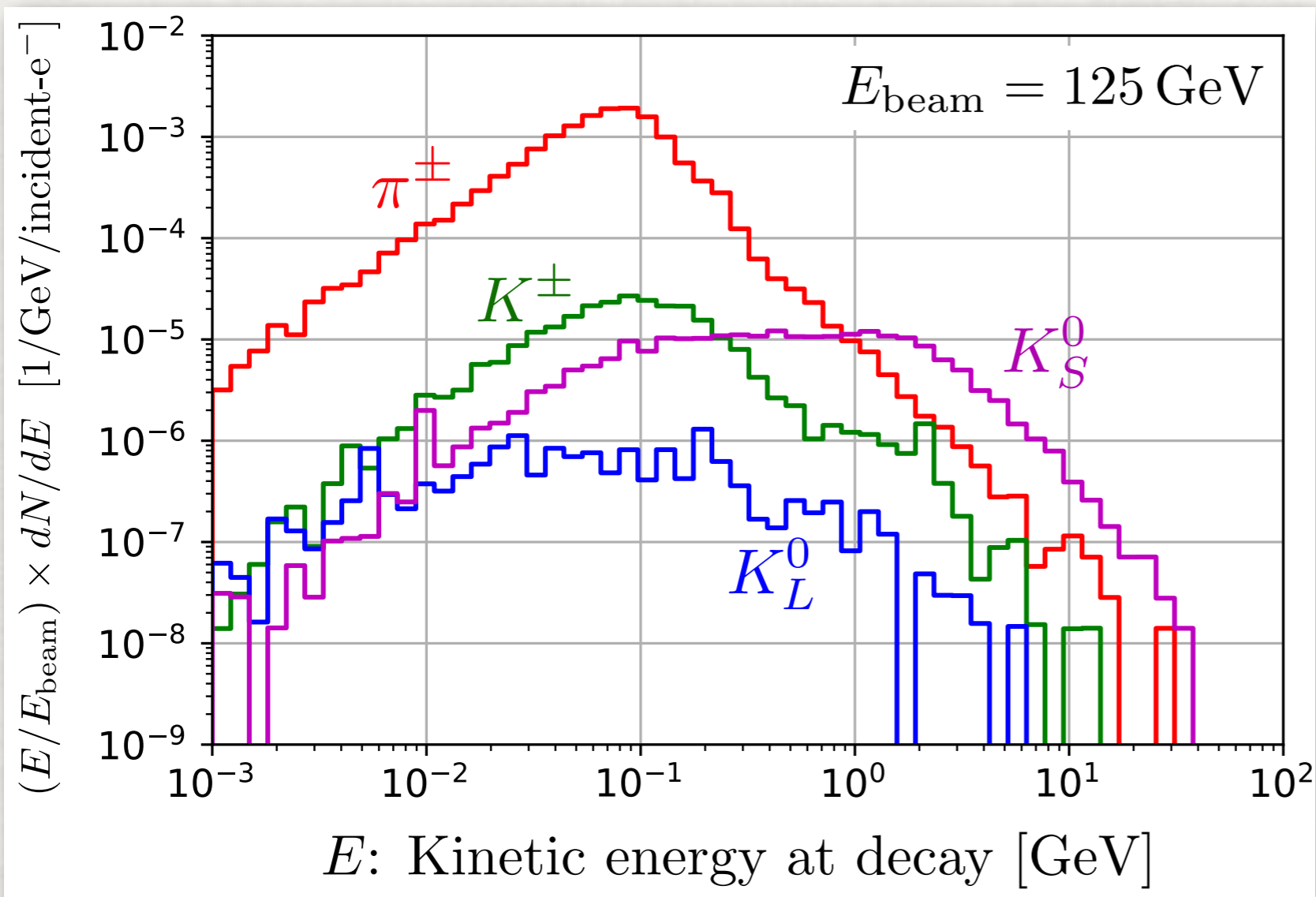


direct production

ハドロンの物質中での減速

メソンはさらにhadronic 相互作用をする。

寿命が長いほど、Nの運動量に関する崩壊時のエネルギーが低くなる(acceptance に影響)



$$K^+ = 1.24 \times 10^{-8} \text{ s}$$

$$K_S = 8.95 \times 10^{-11} \text{ s}$$

$$K_L = 5.12 \times 10^{-8} \text{ s}$$

K_S はすぐに崩壊

→物質の影響による減速の影響がない。

D life time は

$10^{-12} \sim 10^{-13} \text{ s}$ なので

さらに減速効果は少ない

MESON DECAY

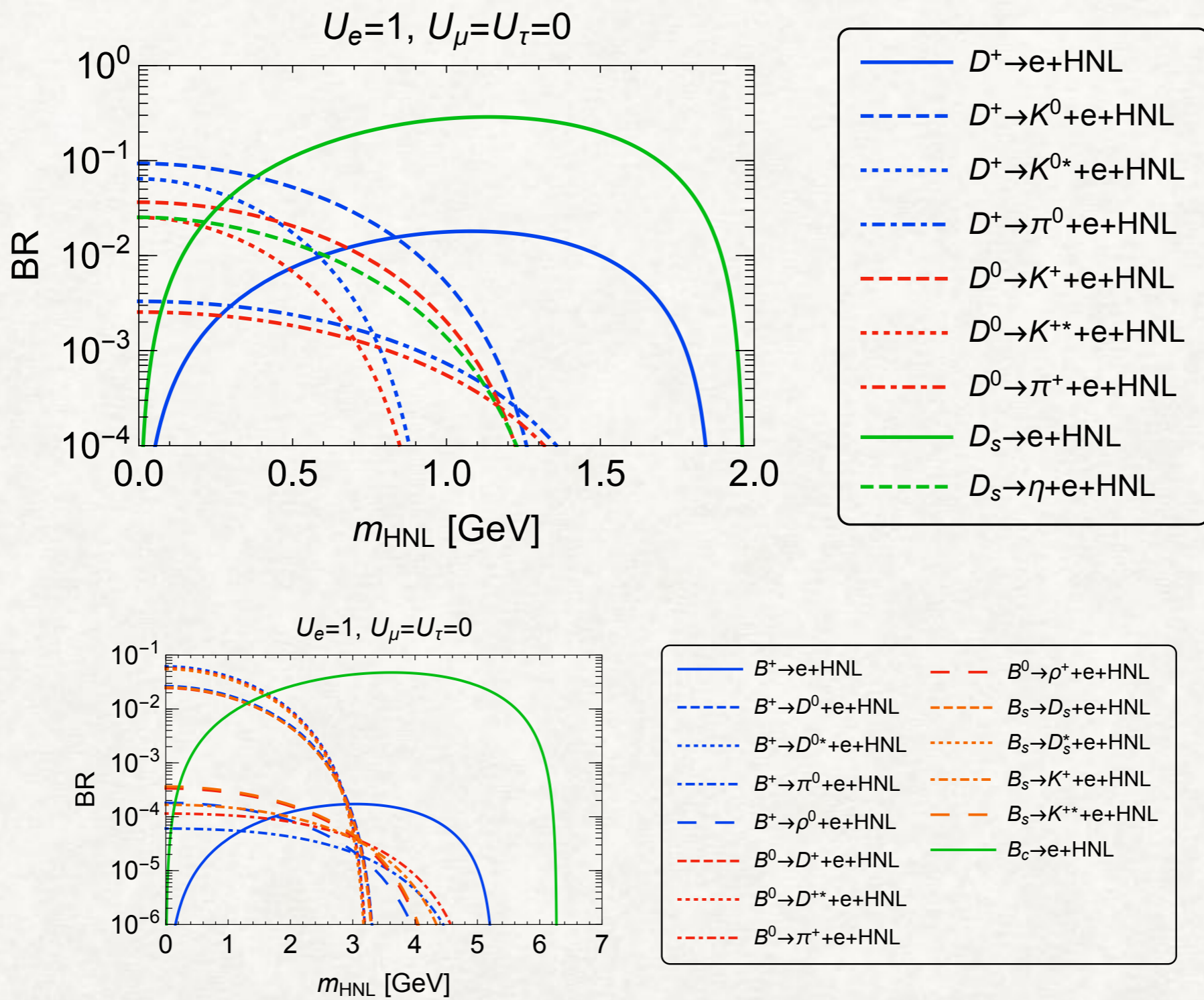


Figure 14. The same plot as Fig. 12 but for beauty mesons.

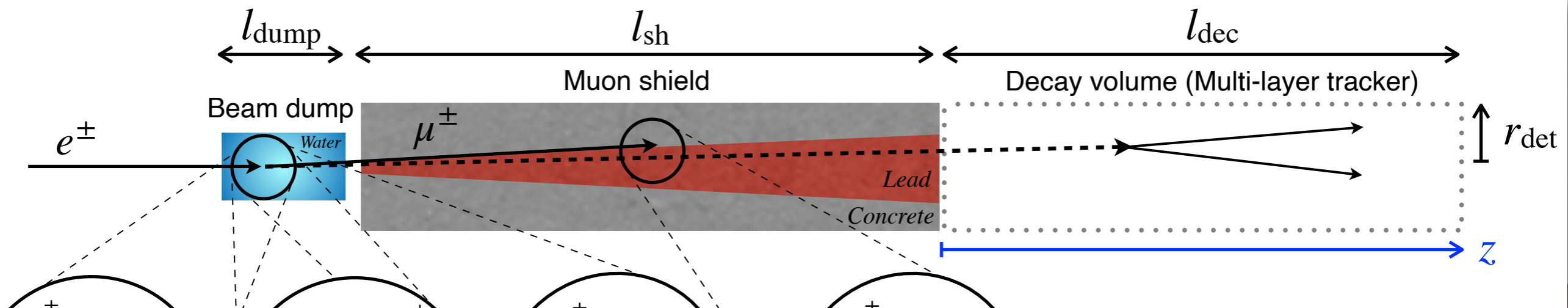
信号の効率とバックグラウンド

Decay volume で崩壊し、その粒子が複数測定器に入ることが必要. 適切なライフタイム($O(10\sim 100\text{m})$)とブーストが必要

Background は? beam dump からの大量の ν \rightarrow 原子核との相互作用が、muon シールドの終端でおこる $\rightarrow \pi, K$ とかがフラフラ現れ崩壊する。

(SHiP などのstudy から)

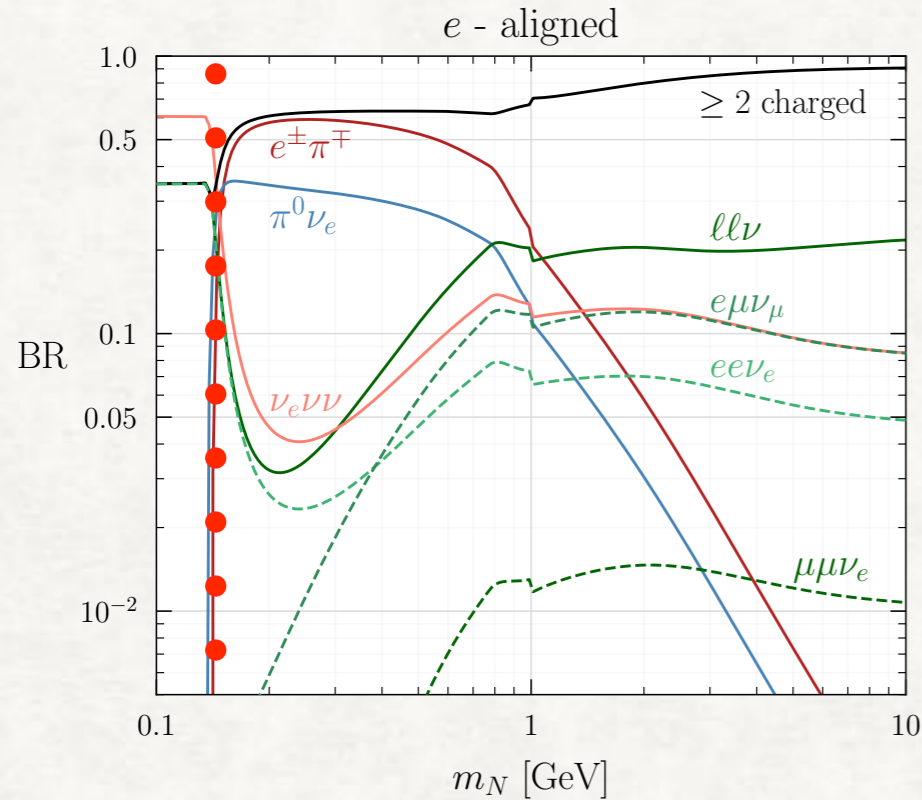
複数トラックとNの運動量が beam dump から来たことと整合していることを要求すると相当バックグラウンドは落ちる。どこまで測定器を頑張るかだが荷電粒子の測定は安い。中性粒子 (γ) の測定は高く効率が悪い。



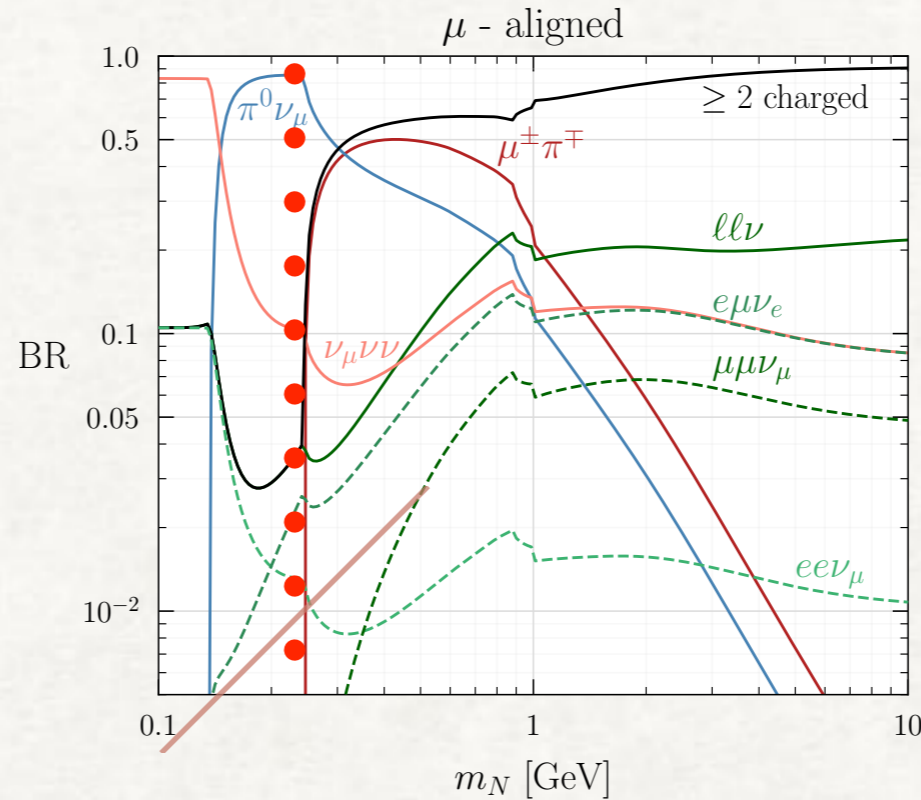
HNL のDECAYパターン

Giffin, Gori, Tsai, Tuckler
2206.113745

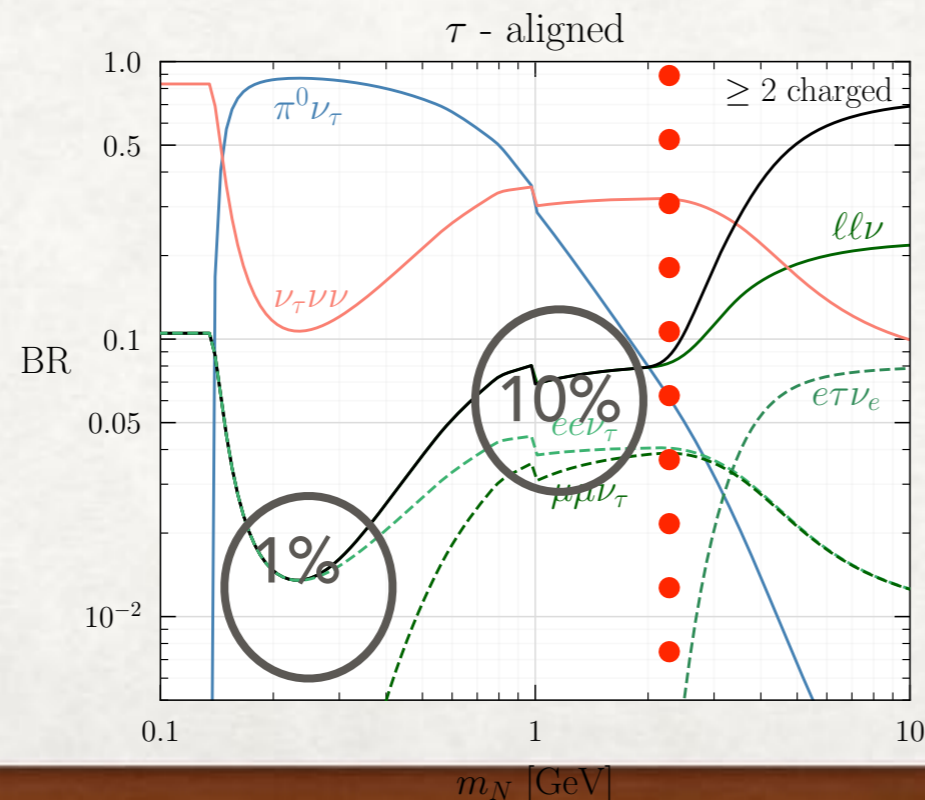
ν_e との混合



ν_μ との混合



ν_τ との混合



1st and 2nd generation ではほぼ $n_{ch} \geq 2$.
3rd gen と混合し、 τ より軽い場合は苦戦

$m_N < 1\text{GeV}$ では個別のハドロンモードを計算. それ以上では $q\bar{q}'\nu$ に崩壊すると思って計算



実線: 実線は10年の運転で 3 visible イベント (3νは除いたが π0モード等が入っている)
 muon shield からでてくるbackground も考慮して、

$n_{ch} \geq 2$ で10.9 イベントをsensitivity のある領域と変更する予定。

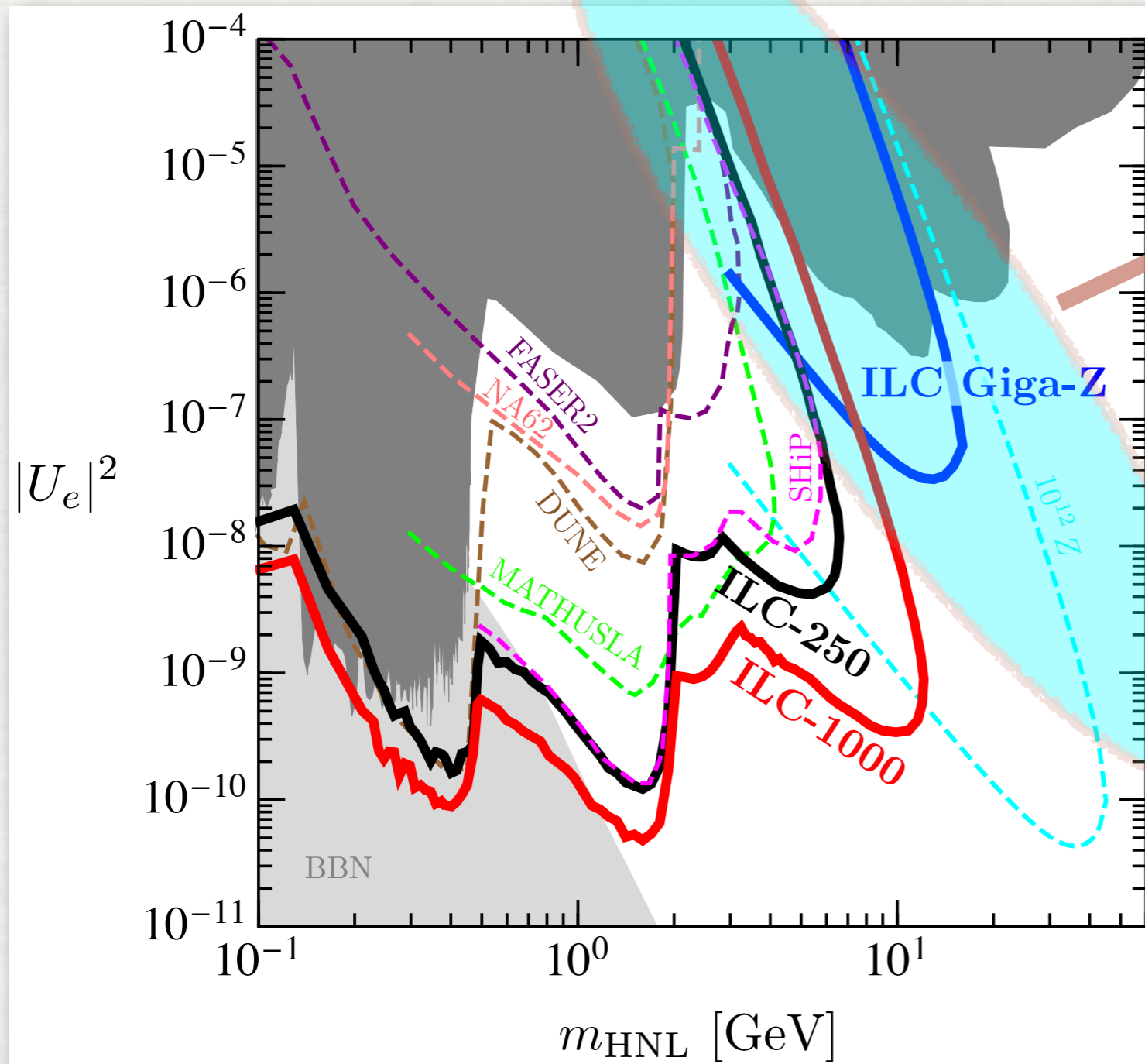
図の変化はe, μに関しては微小

競合する論文2206.13745 は1年で10 event で評価. charm のthreshold でみると

Faser 2 より少し悪い(detector set up dependent) そのほか 生成断面積の評価

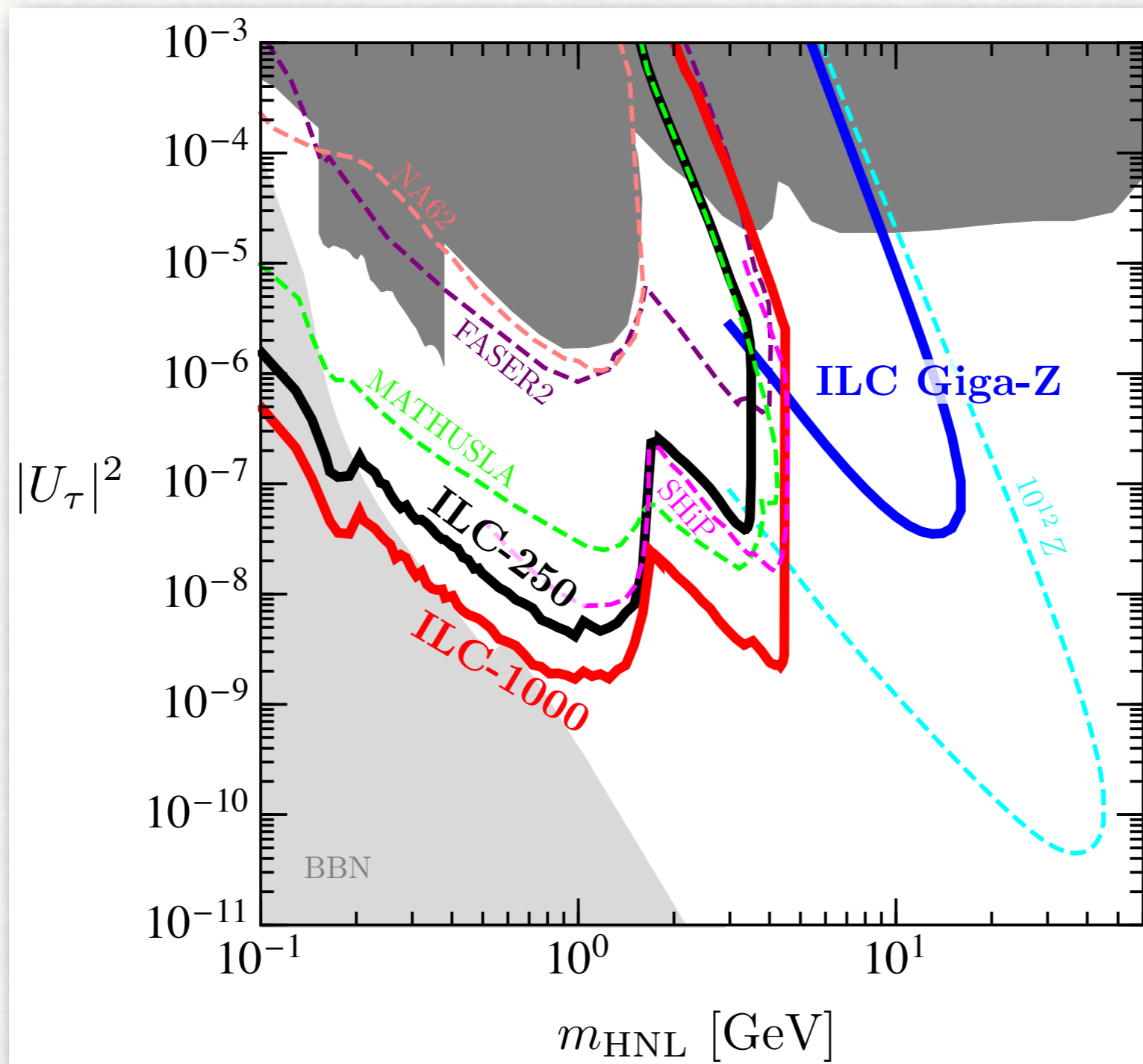
EM shower、粒子減速の効果の評価、多段プロセスのハドロン生成などの取り込みが我々と比べると不十分

BEAM DUMP 以外の制限と他の将来計画



Main の測定器での、Z 崩壊からの
N の生成

FASER 2
NA62
DUNE
MATHUSLA (unlikely)
SHiP(unlikely)



HEAVY NEUTRAL LEPTON SEARCH の面白さ

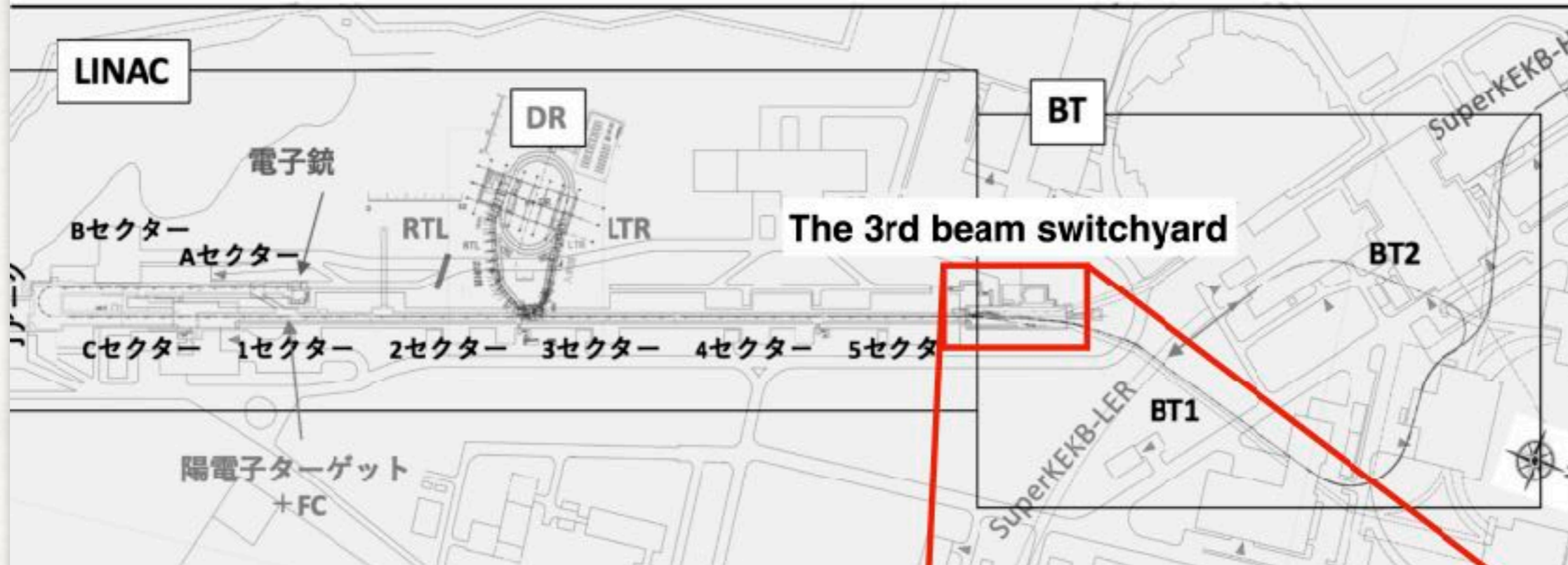
- axion like particle search などと比べると、生成過程、崩壊仮定が複雑。N の親粒子として考えないといけないもの $e^+, e^-, \gamma, \mu, \tau, K, D, B$
- 複数の生成モードが重要

charged current $e \rightarrow N$ etc ,

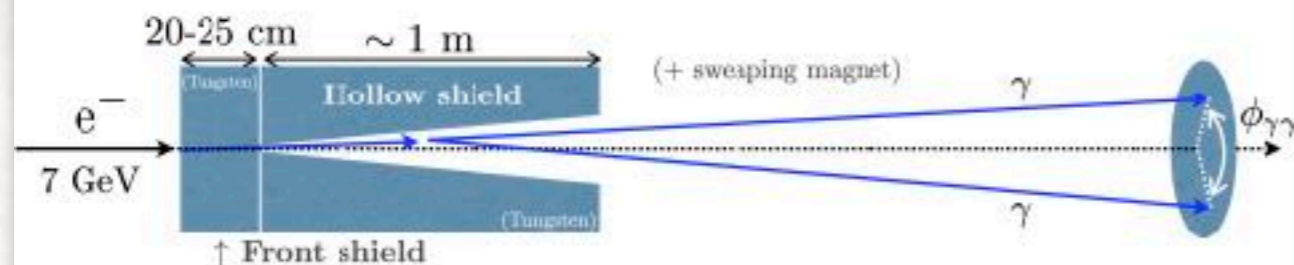
Meson decay (mass に対する依存性)

- linear collider の特殊性 (beam dump に多数の電子が当たる)
proton のビームダンプ実験に比べると1ビーム粒子あたりのハドロンは少ないはずだが、それでも同等程度までいく。

KEK fixed target experiment



"Thin" shield setup

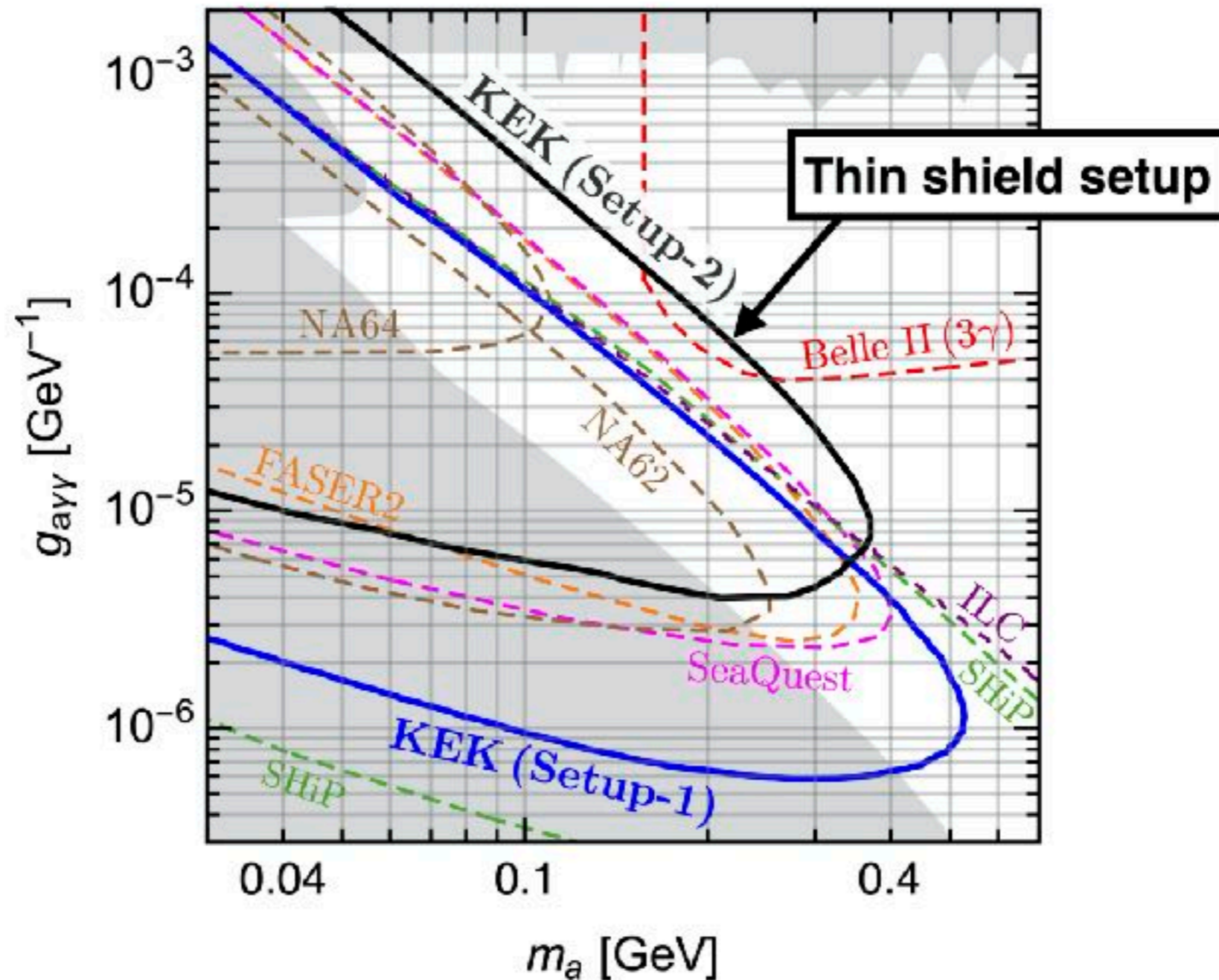


- Stop only EM shower. Neutral hadrons are BG.
- **Higher beam energy** is ideal to avoid new particle decay in shield. → **Suitable for ILC!**



Photo by Hiroshi Iwase

Results



- New regions can be explored.
- **Complementary** to the **main beam dump experiment**.
- **Small** setup

LHC実験とLONG LIVED PARTICLE: FASER

