

極低閾値量子センサーで読み解く 局所ダークマターの速度分布 ーハローに依らない解析ー

安田 航一朗 (UCLA)

共同研究者 : Muping Chen (QUP), Graciela B. Gelmini (UCLA), Volodymyr Takhistov (QUP, IPMU)

arXiv: 2606.25129 [hep-ph]

ダークマターは何者なのか？



higgstan.com

➤ 宇宙を漂う謎の存在

→ 宇宙の物質の約 85% は光を出さない「ダークマター(DM)」

➤ 状況証拠はたくさん見つかったている

→ 銀河の回転曲線・重力レンズ・CMB and more...

➤ 候補は膨大

→ 候補質量は 10^{-22} eV からブラックホールまで数十桁

→ 今回扱うのは、sub-GeV から GeV 帯の particle DM

正体の解明には、重力以外の手がかかり — 粒子としての相互作用を直接捉える必要がある

DM 直接探索とハロー関数

銀河ハロー = DM の「海」

速さ分布 $F(v)$ を持つ

太陽系が $\sim 230 \text{ km/s}$ で疾走している
→ DM の「風」が吹く

地上の検出器

電子・原子核反跳 E' を観測

- 観測レートは必ずこの組み合わせ

$$\frac{dR}{dE'} = \underbrace{(m_\chi, \bar{\sigma}_e, \text{応答})}_{\text{粒子物理} \times \text{検出器}} \otimes \underbrace{\tilde{\eta}(v_{\min})}_{\text{天体物理}}$$

- 速さの情報はハロー関数に集約

$$\tilde{\eta}(v_{\min}) \propto \int_{v_{\min}}^{\infty} dv \frac{F(v)}{v}$$

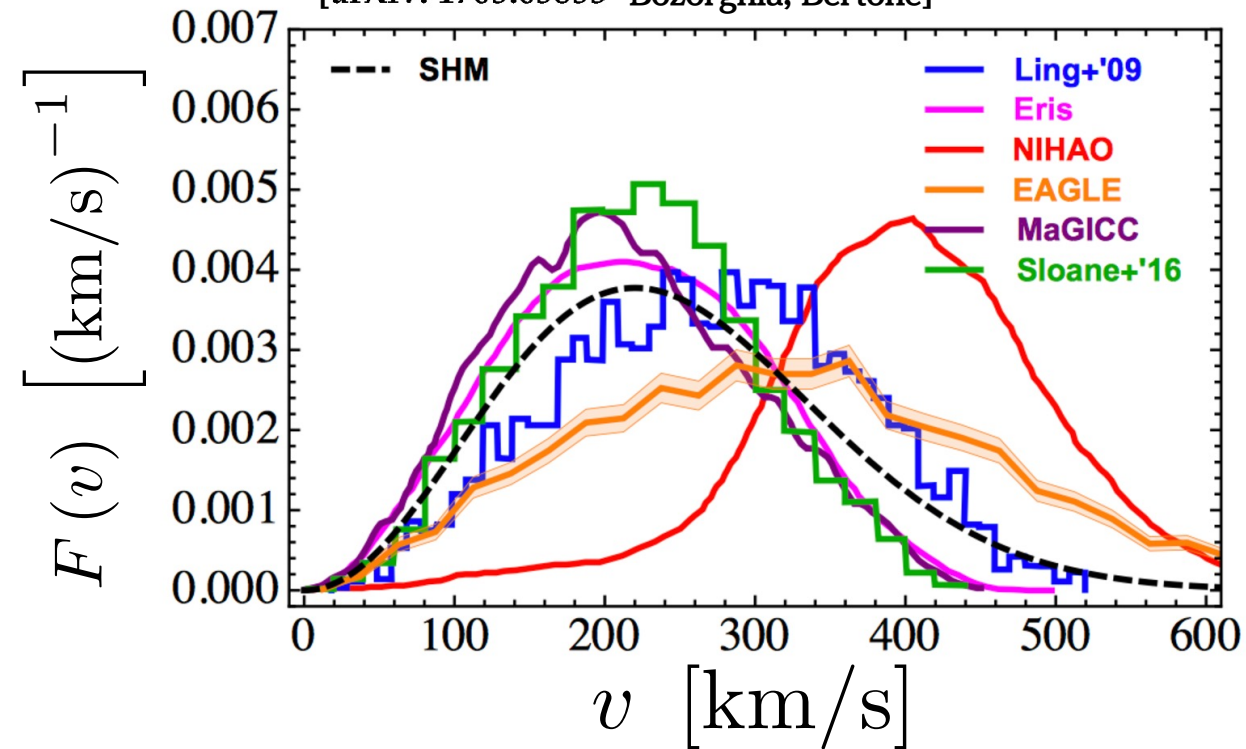
- 従来手法

→ $F(v)$: 標準ハローモデル (SHM) を仮定

→ 信号の解釈/ 上限/ 実験比較は $F(v)$ 依存

SHM は仮定に過ぎない

[arXiv: 1705.05853 Bozorgnia, Bertone]



流体シミュレーション vs SHM (破線)

量	精度	手法 (積分量か高速の裾)
v_0	$233 \pm 3 \text{ km/s (1\%)}$	Sgr A* + $R_0 + V_\odot$
v_{esc}	$528^{+24}_{-25} \text{ km/s (5\%)}$	高速星の裾
ρ_{local}	$0.44 \pm 0.13 \text{ (30\%)}$	鉛直 Jeans(系統支配)

- $F(v)$ の直接測定は乏しい
 - 高速は桁でずれる
 - 低速は方法自体が無感度
- SHMが正しい保証はない

本講演: この「仮定」を「測定」に変える — $\tilde{\eta}(v_{\text{min}})$ を検出器信号だけから再構成する

ハローに依らない解析 (Halo-independent (HI) analysis)

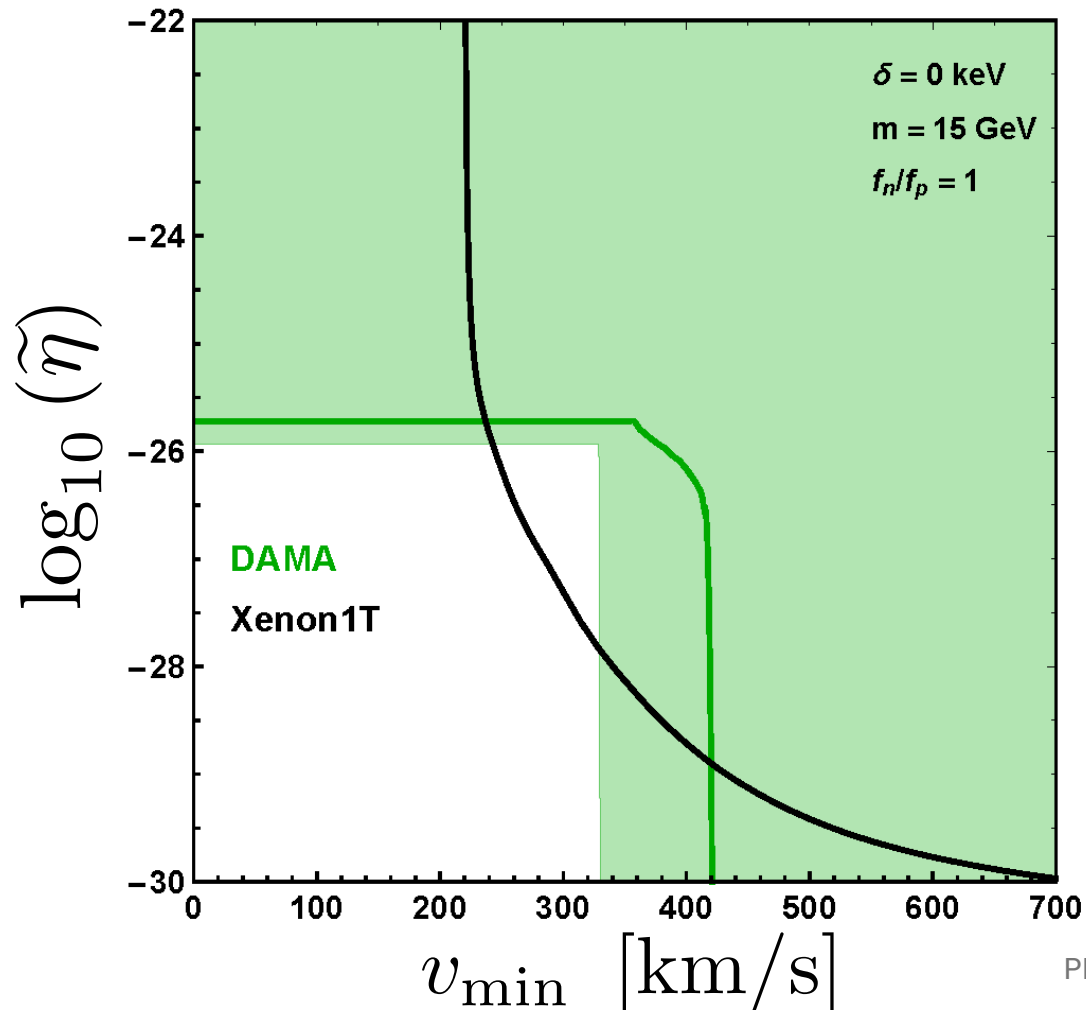
- **DM直接探索の解析の特徴** [arXiv: 1011.1910 Fox, Kribs, Tait]
 - $F(v) \geq 0$ のみしか仮定せずに解析すると m_χ の上限すら決まらない
- **どの解析も何かしら固定する**
 - ならスキャンできる側を固定しよう [arXiv: 1011.1915 Fox, Liu, Weiner]

	従来 (ハロー依存)	本解析 (HI)
固定	相互作用・運動学 + ハロー $F(v) = \text{SHM}$	相互作用・運動学 + 質量 (スキャン)
測るもの 有効性	$(m_\chi, \bar{\sigma}_e)$ 領域 SHM が正しい限り	$\tilde{\eta}(v_{\min})$ (非負・非増加のみ課す) あらゆるハローで成立・実験間検定可能

「仮定はスキャンできる量に、自由は未知の関数に」
HI $\neq$ 無仮定 — 粒子仮説条件付き (依存性は明示的でスキャンできる)

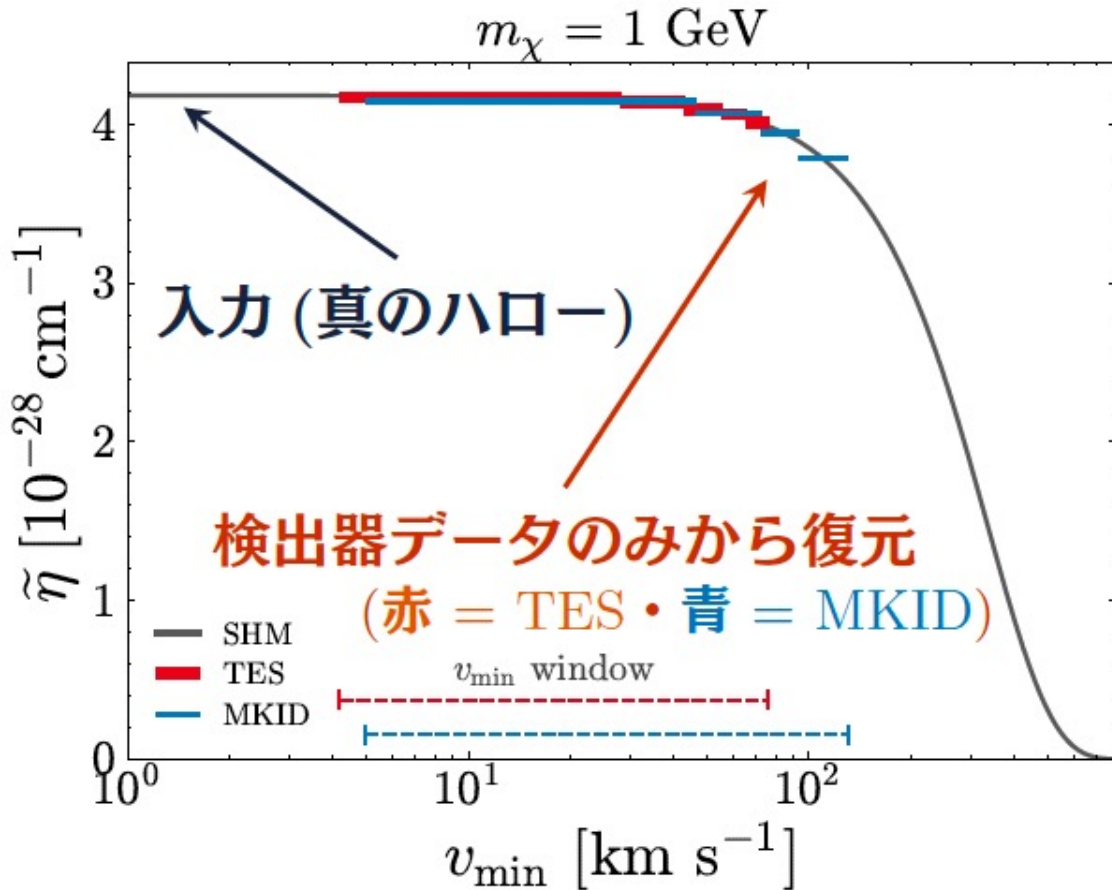
HI 解析の実践例

[arXiv: 1703.06892 Witte, Gelmini + Witte UCLA DM 2018]



- **DAMA vs XENON1T の裁定**
 - 緑：DAMAが要求する $\tilde{\eta}$
 - 黒：XENON1T の上限
- どんな非負・非増加 $\tilde{\eta}$ でも両立不可
- 全ハローでこの模型の $m_\chi = 15 \text{ GeV}$ 排除
- **ここからやること**
 - 確立済みの武器をsub-eV・電子散乱へ
 - イベントから $\tilde{\eta}$ を再構成できるの？

メインの結果



➤ 用意するもの

- 次世代検出器(TES/MKID)の物質応答
- DM粒子仮説 (e^- 散乱と関係するもの)
(今回は重い媒介粒子が伴う模型を扱う)
- 質量 m_χ を固定し仮説毎にスキャン

➤ 仮定しないもの

- ハロー模型

➤ 復元対象=ハロー関数

$$\tilde{\eta} = \frac{\rho_\chi \bar{\sigma}_e}{m_\chi} \int_{v_{\text{min}}}^{\infty} dv \frac{F}{v}$$

sub-eV 量子センサー (TES & MKID) から、ハロー模型なしで局所ハロー関数を再構成できる

低速DM成分と量子センサー

- 運動学：速度 v の DM が付与できる最大のエネルギー

$$E \leq \frac{1}{2} m_\chi v^2 \Rightarrow v_* = \sqrt{\frac{2E}{m_\chi}}$$

→ $m_\chi = 1 \text{ GeV}$, $E' = 0.1 \text{ eV}$ に必要な速度は**わずか** 4.2 km/s

[arXiv: 2506.10070 Chen et al.]

TES

MKID

構成	Al 吸収体+TES 読出し	TiN 共振器=標的
しきい値	0.1 eV	0.2 eV
分解能 Δ	36 meV	130 meV
窓 (1 GeV)	4.2 – 78	5.0 – 134
窓 (10 MeV)	42.5 – 150	56 – 168

ダークディスク (分散 $\sim 50 \text{ km/s}$ の共回転成分) と地球捕獲成分 ($v \leq 11.2 \text{ km/s}$) の検証に重要

HI 解析の構造

$$\frac{dR}{dE'}(E') = \int_0^\infty dv_{\min} \frac{d\mathcal{R}}{dE'}(v_{\min}, E') \tilde{\eta}(v_{\min})$$

検出器
分解能 G ・ 効率 ε

×

物質応答
 $S(q, E) \propto \text{Im}[-1/\epsilon_L]$

×

DM- e 相互作用
 $\mathcal{F}_{\text{med}}(q)$ (重い媒介 $\Rightarrow 1$)

×

ハロ一関数
 $\tilde{\eta}(v_{\min})$

➤ **応答関数**：実験装置と DM 粒子仮説が決める

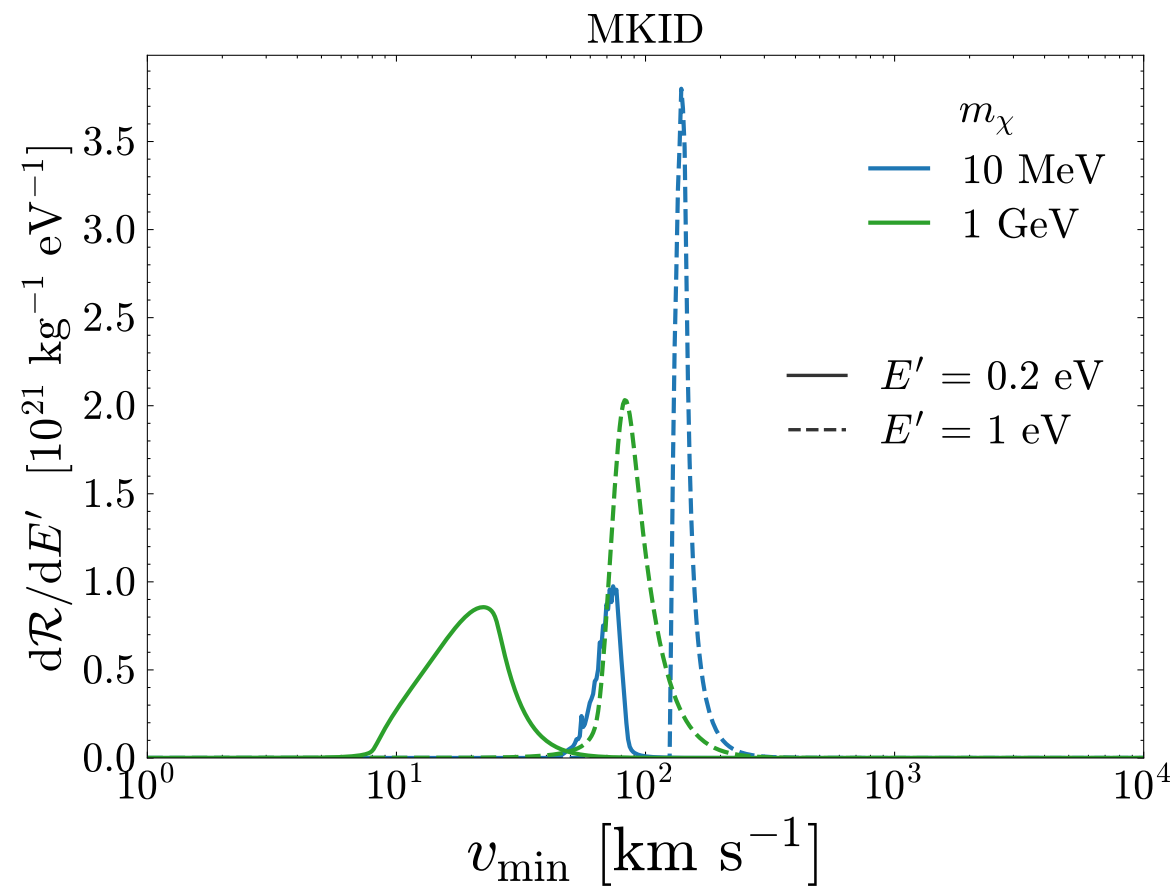
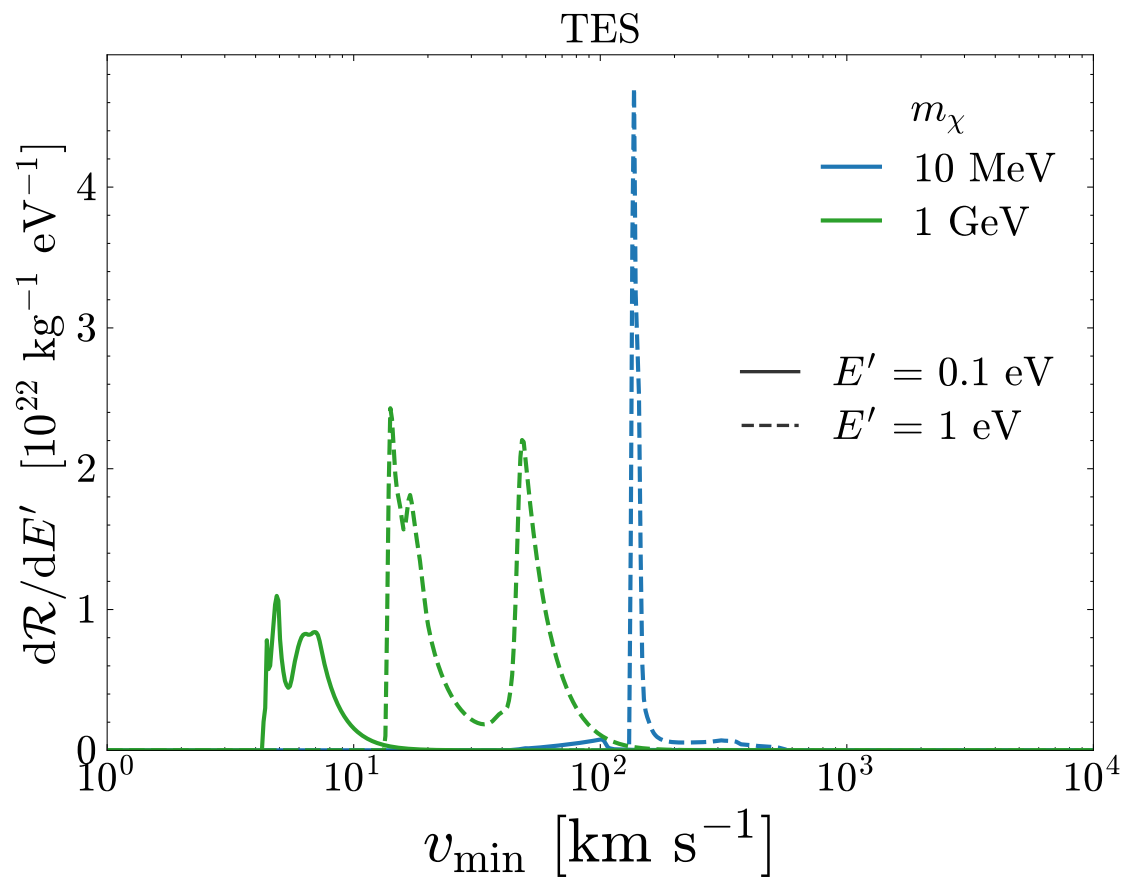
$$\frac{d\mathcal{R}}{dE'} = \frac{1}{4\pi\rho_T\mu_{\chi e}^2} \varepsilon(E') \sum_{\lambda=\pm} \int_0^{E_{\max}(v_{\min})} dE G(E, E') \left| \frac{\partial q_\lambda}{\partial v_{\min}} \right| q_\lambda |\mathcal{F}(q_\lambda)|^2 S(q_\lambda, E)$$

➤ **ハロ一関数**：全実験に共通の未知関数(非負・非増加)

応答関数は $v_{\min}$ の「窓」

Al 応答 (TES)

TiN 応答 (MKID: Lindhard 近似)

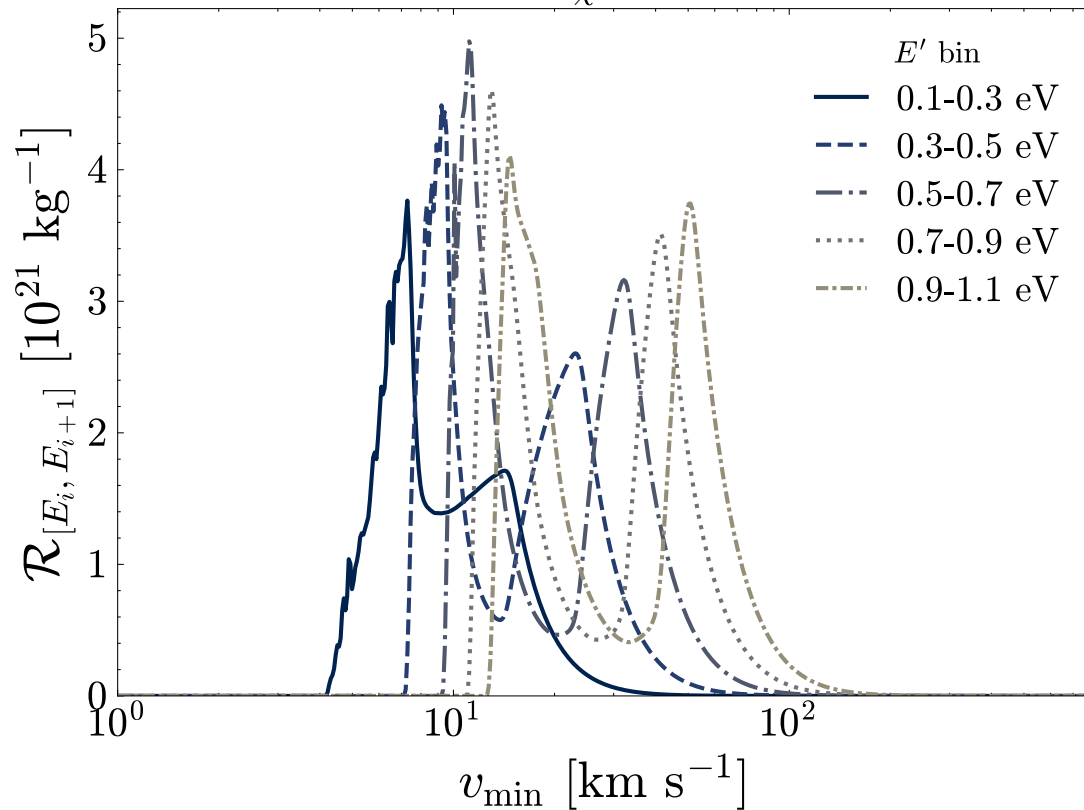


➤ TES と MKID で窓はズレて重なる (相補的)

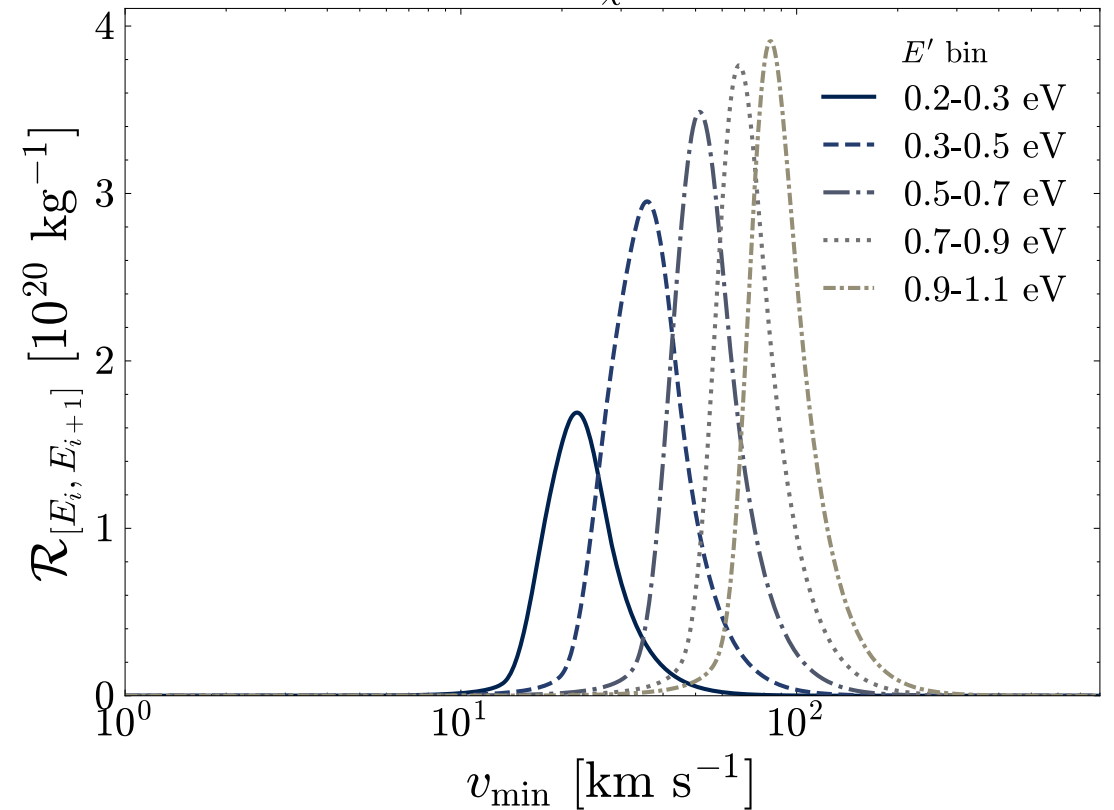
観測エネルギービン毎の積分応答

$$\mathcal{R}_{[E'_i, E'_{i+1}]} \equiv \int_{E'}^{E'_{i+1}} dE' \frac{\partial \mathcal{R}}{\partial E'}$$

TES, $m_\chi = 1 \text{ GeV}$



MKID, $m_\chi = 1 \text{ GeV}$



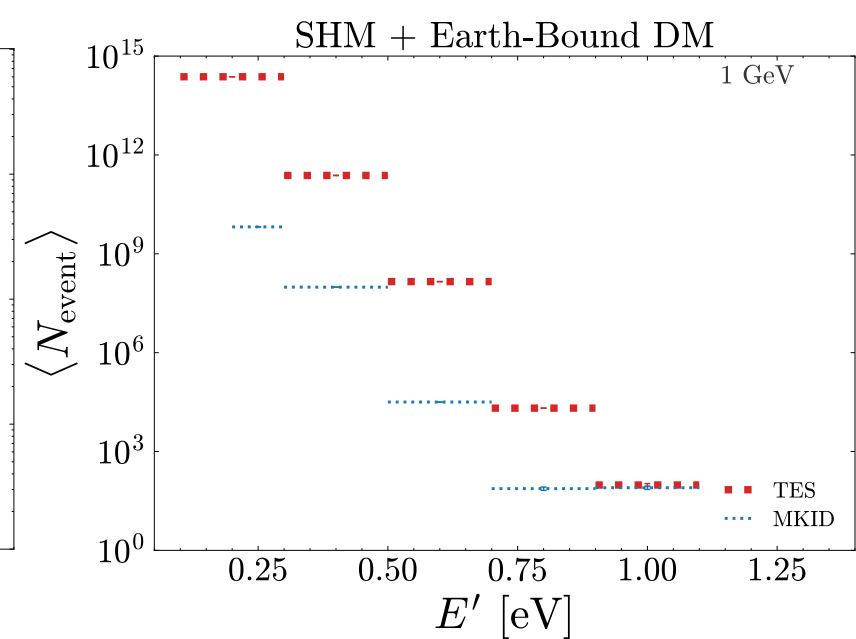
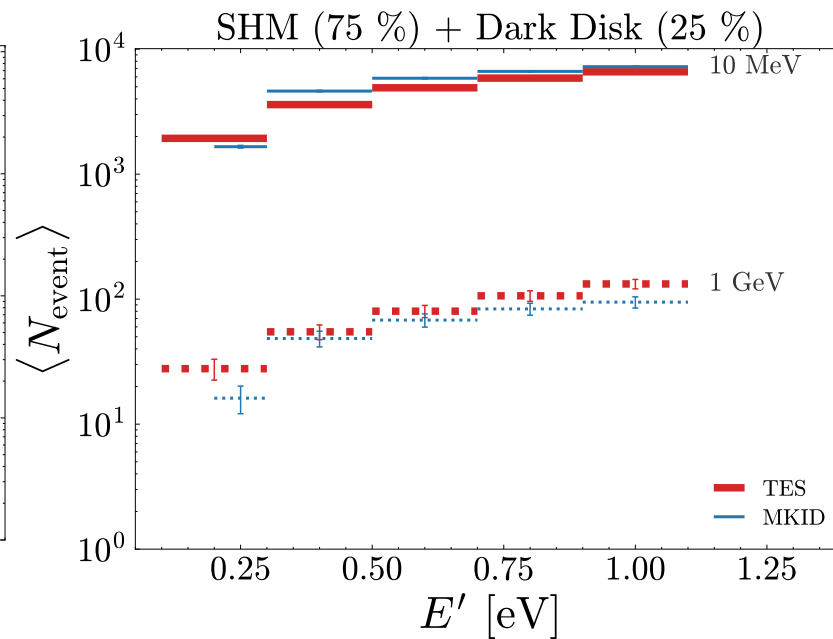
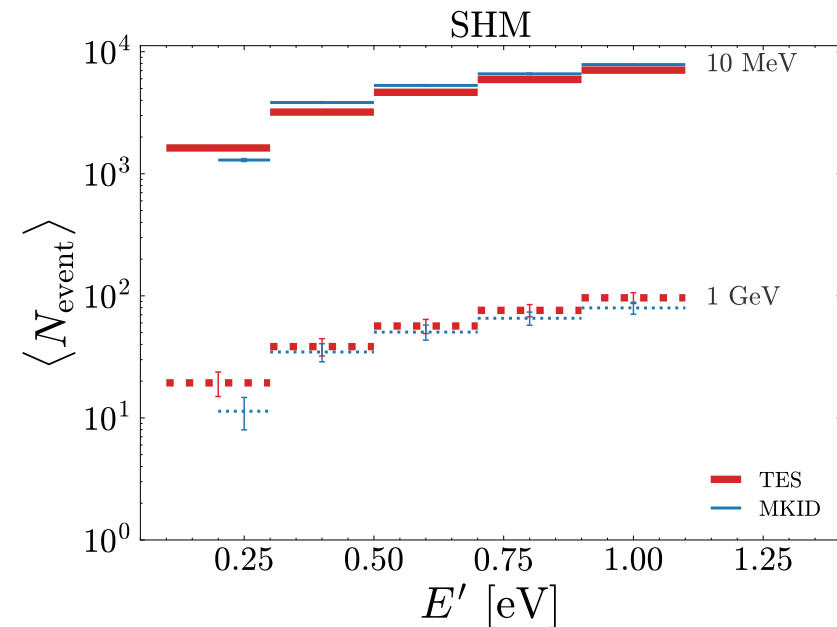
→ 低速こそ現実的ターゲット

3つのベンチマークハロー

➤ 期待されるイベント数を生成

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{TES: } \mathcal{E} = 8.2 \mu\text{g} \cdot \text{month} \\ \text{MKID: } \mathcal{E} = 4.2 \text{ mg} \cdot \text{year} \end{array} \right.$$

ベンチマーク	v_0 [km/s]	v_e [km/s]	特徴
SHM	238	250	平坦な基準線
+ ダークディスク (DD)	70	100	低速の「こぶ」 (共回転; $f_{\text{DD}} = 5\%, 25\%$)
+ 地球捕獲 (EB)	2.2	0	急峻な立ち上がり ($v \leq 11.2$ km/s)



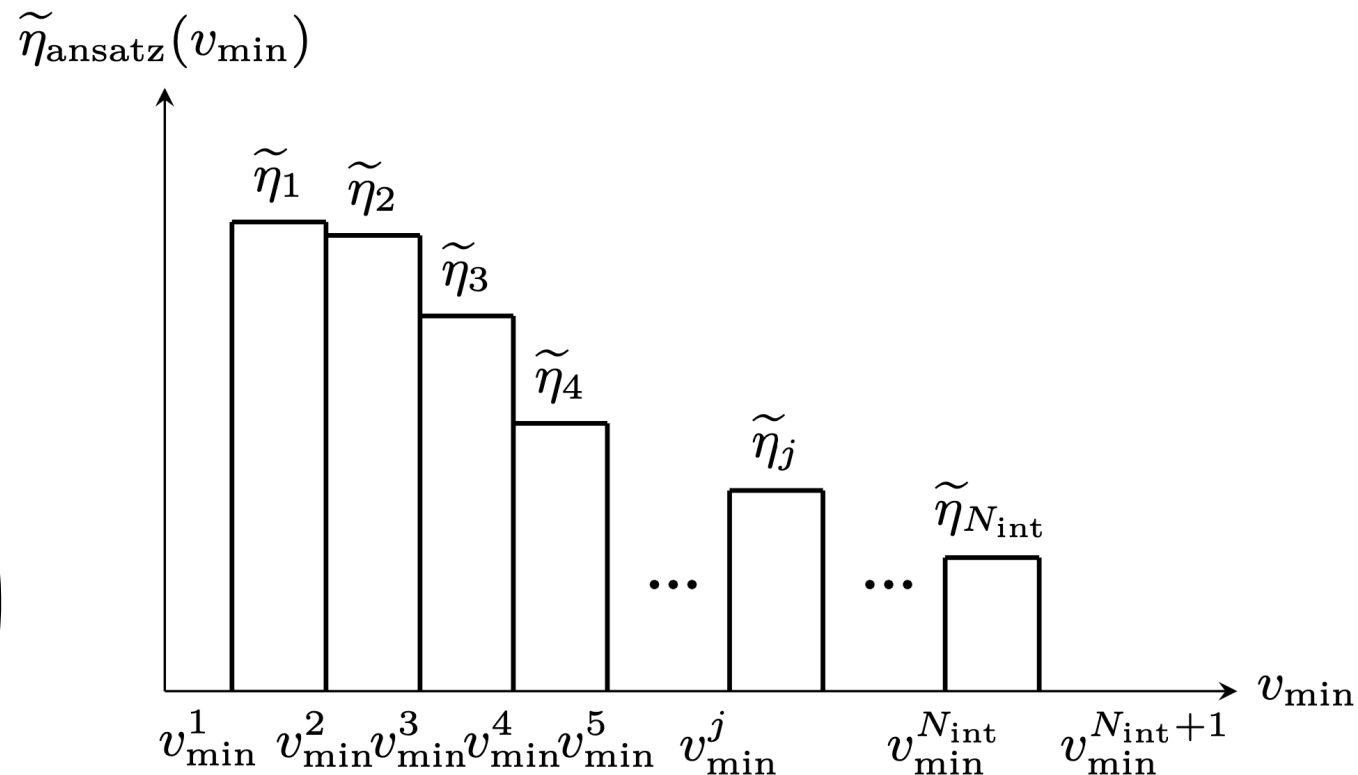
HI 解析の数値実装

➤ 未知関数を区間分割

→ イベント数は $\tilde{\eta}$ に関して線形

$$\mu_i = \mathcal{E} \sum_j \mathcal{R}_{ij} \tilde{\eta}_j$$

$$\left(\mathcal{R}_{ij} \equiv \int_{v_{\min}^j}^{v_{\min}^{j+1}} dv_{\min} \mathcal{R}_{[E'_i, E'_{i+1}]} \right)$$



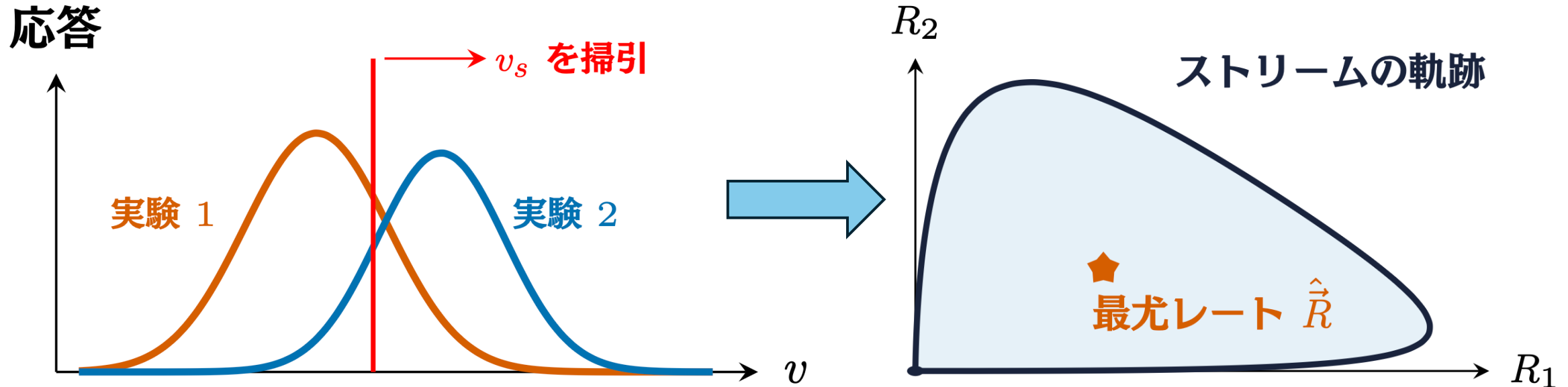
➤ Neyman χ^2 を拘束最小化

$$\chi^2 = \sum_i \frac{[\mathcal{E} (\mathcal{R} \cdot \tilde{\eta})_i - \mathcal{O}_i]^2}{\mathcal{O}_i} \quad (\tilde{\eta}_j \geq \tilde{\eta}_{j+1} \geq 0)$$

$$\begin{cases} \mathcal{E} & : \text{露光 (ターゲット質量} \times \text{時間)} \\ \mathcal{O}_i & : \text{観測イベント数} \end{cases}$$

ベストフィットはどんな形？

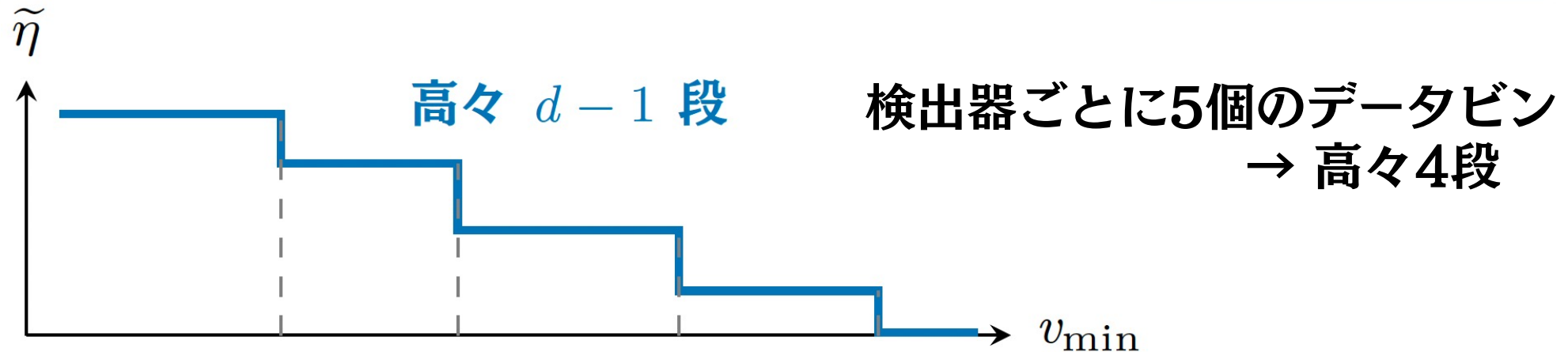
- ストリーム = 単一速度の分布 $\propto \delta(v - v_s) \rightarrow \tilde{\eta}$ では「1 段の階段」



- **どんなハローも「ストリームの混ぜ合わせ」で書ける**
 - 混ぜたハローの予言レートは、曲線上の点の重み付き平均
 - 平均で届く範囲が塗った領域(= 曲線の凸包)
- **最尤レートも塗りの中**
 - 少数のストリームを混ぜるだけで再現できる

凸幾何学からの裏付け

定理 (凸幾何; Gelmini–Huh–Witte 2017): 尤度が d 個の予言レート (いずれも $\tilde{\eta}$ に線形) のみを通して $\tilde{\eta}$ に依存するとき、高々 $d - 1$ 段の非増加階段関数 $\tilde{\eta}(v_{\min})$ で最大化できる



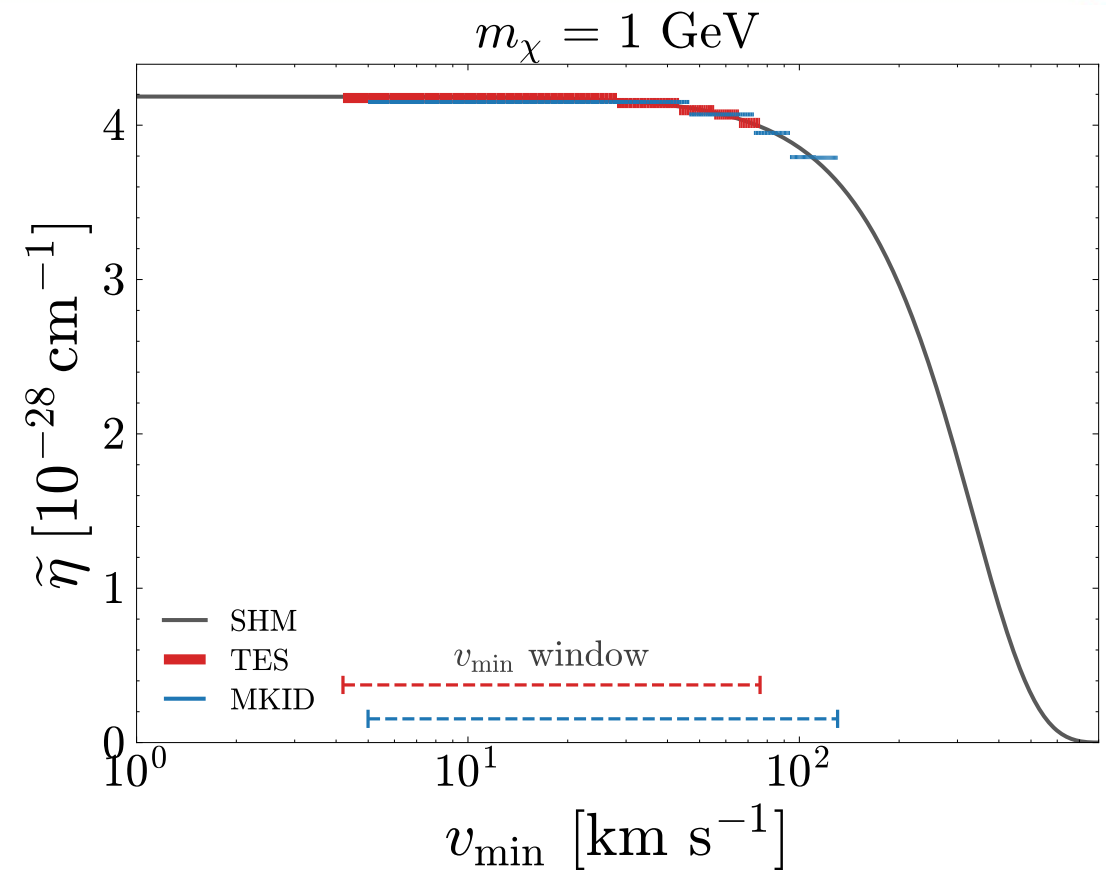
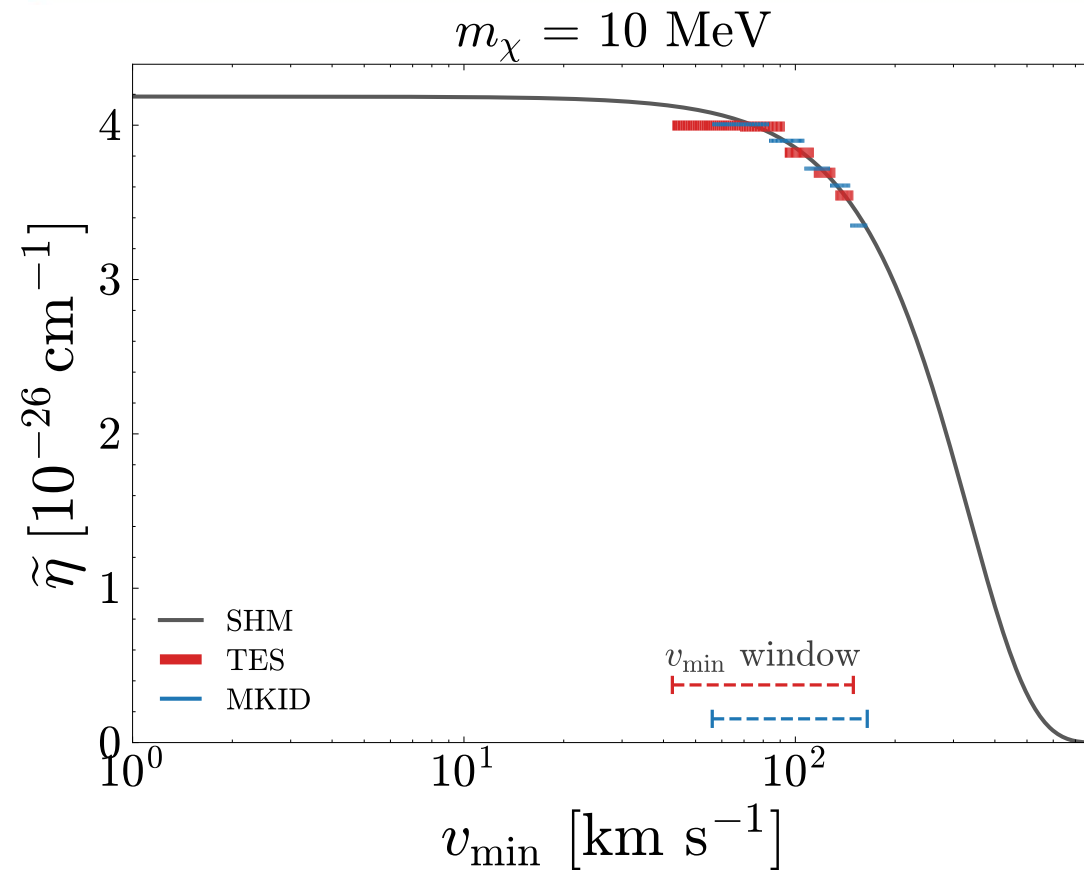
➤ 同様の定理は、他の散乱現象でも重要

e.g. CE ν NS による sub-MeV 原子炉 $\bar{\nu}_e$ フラックス再構成 (Unfolding)

[arXiv: 2608.16107 Chen, Gelmini, Marfatia, and KY]

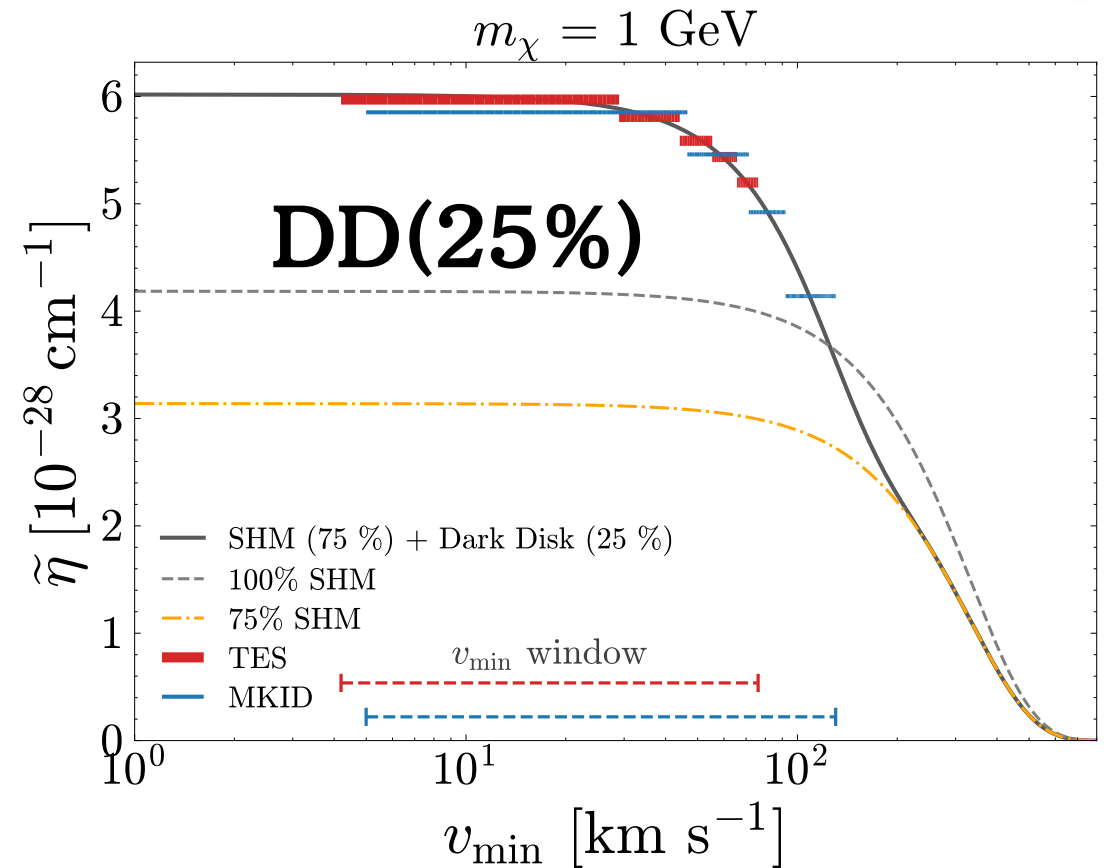
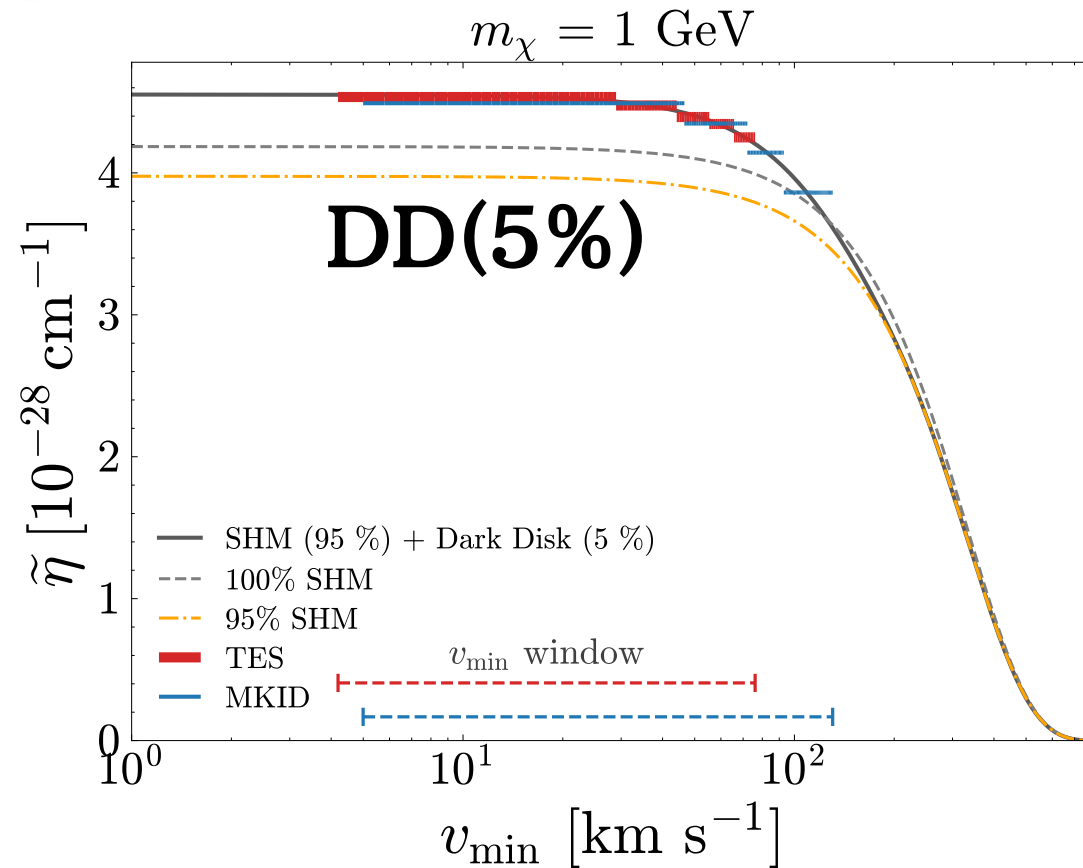
結果 1 : SHM 再構成

仮定するもの: m_χ ・ 重い媒介粒子 (スキャン可) / しないもの: ハロー模型



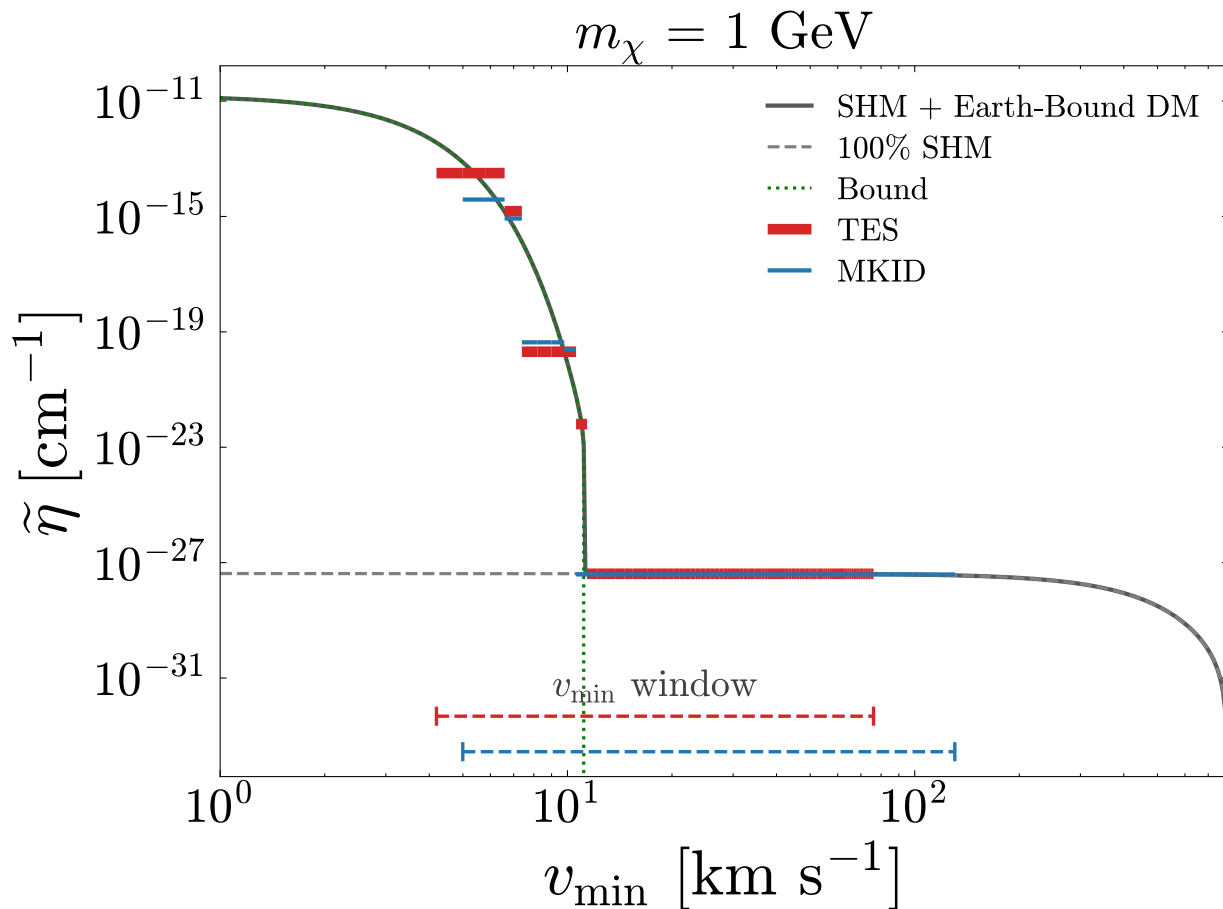
結果 2 : SHM + DD 再構成

仮定するもの: m_χ ・ 重い媒介粒子 (スキャン可) / しないもの: ハロー模型



結果 3 : SHM + EB 再構成

仮定するもの: m_χ ・ 重い媒介粒子 (スキャン可) / しないもの: ハロー模型



➤ **地球束縛成分の巨大な低速成分**
→ $\tilde{\eta}$ は窓の中で十数桁も落ちる「崖」

➤ **段はこの崖の位置と高さを捕捉**
→ 平滑性仮定なし
→ 急な崖もなまらずに追える

➤ **注意: EB 密度は現行上限を仮定**
→ 10^{15} イベントは上限シナリオ

まとめと展望

➤ SHM は「仮定」の一つ

→ 検出器データから、ハロー関数 $\tilde{\eta}$ を再構成する(HI 解析)

➤ 仮定は DM 粒子仮説(m_χ ・重い媒介粒子)

→ $\tilde{\eta}$ には非負・非増加のみ

→ ベストフィットは凸幾何の定理により「高々 $d-1$ 段の階段」

➤ sub-eV 量子センサー(TES/MKID)が低速 DM の窓を開く

→ SHM・ダークディスク・地球束縛成分、すべて段で模擬データから再構成できた

→ 但し、他のモデルと区別できるためには、統計的取り扱いが非常に重要（今後）

➤ 多素材化も目指す

→ 閾値の異なる超伝導ナノワイヤー単一光子検出器（SNSPD）を並べて解析