

XENON1T 実験の結果を説明するモデルへの制限

千草 颯

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

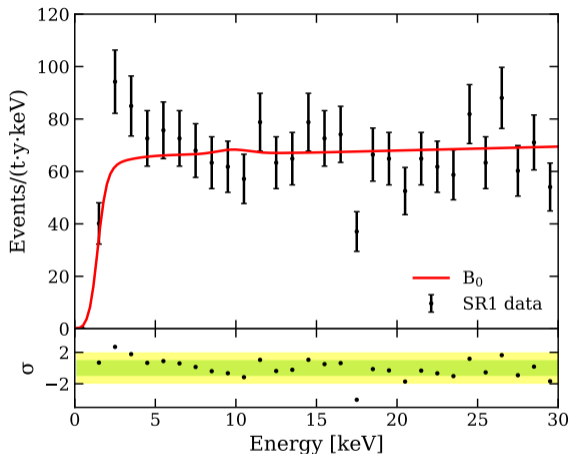
カリフォルニア大学バークレー校

2020/9/8 @ ダークマターの懇談会 2020 online

based on

SC, M. Endo, K. Kohri [2007.01663] (accepted to JCAP)

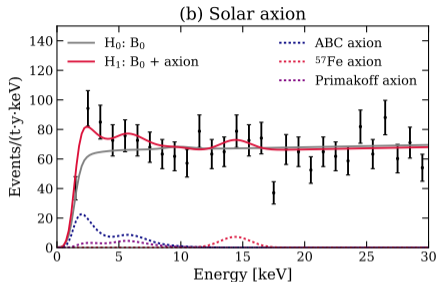
XENON1T 実験と電子散乱事象



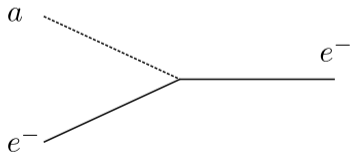
XENON Collaboration [2006.09721]

- ▶ 液体キセノン中の電子散乱を探すセットアップで、反跳エネルギー 1–7 keV の領域に excess
285 observed vs. 232 expected (3.3σ)

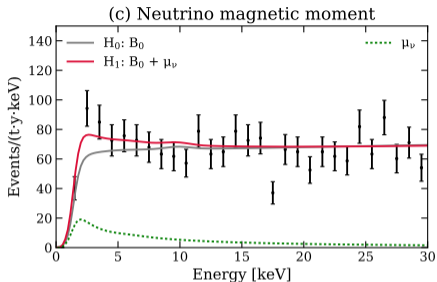
様々な解釈



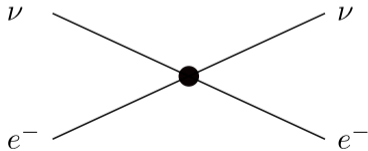
Favored over BG-only at 3.5σ
+ Tritium?



Absorption



Favored over BG-only at 3.2σ
XENON Collaboration [2006.09721]

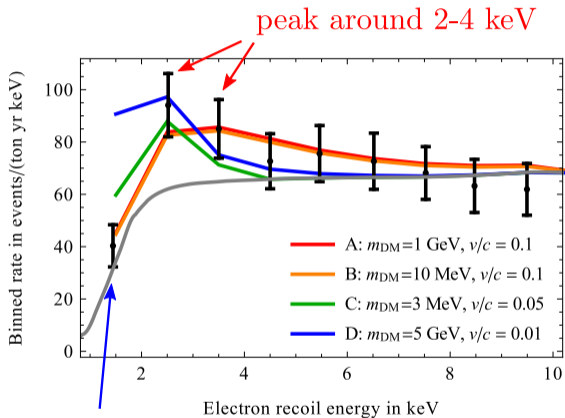


Scattering

▶ ダークマター χ と電子の散乱でも説明できる？

散乱による説明

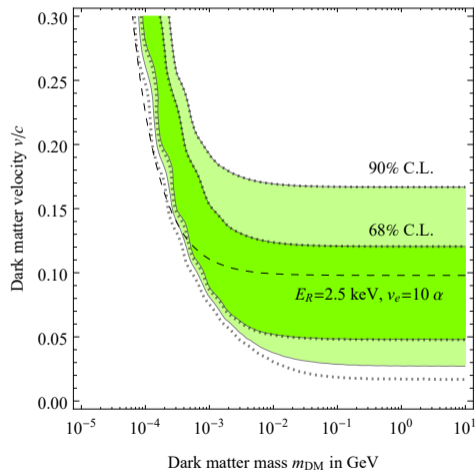
Q. $\chi e \rightarrow \chi e$ で今回の結果を説明しようとする、 χ の妥当な質量・速度は？



A. $m_\chi \gtrsim \mathcal{O}(0.1) \text{ MeV}, v_\chi \sim \mathcal{O}(0.1)$

典型的なダークマター (CDM) $v_{\text{CDM}} \sim 10^{-3}$ より速い

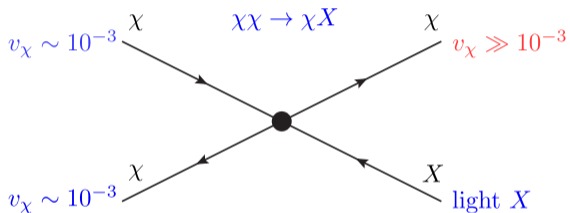
Favoured region



なぜ速いのか？

現在の宇宙で加速：(例として) Semi-annihilation

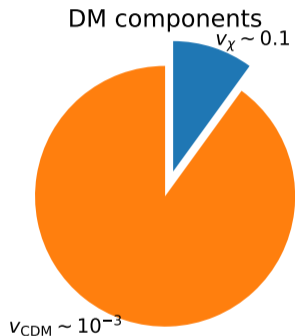
χ は CDM ($v_\chi \sim 10^{-3}$)



$$\gamma_\chi = \frac{5m_\chi^2 - m_X^2}{4m_\chi^2}, v_\chi \leq 0.6$$

B. Fornal⁺ [2006.11264]

ダークマターの一部が元から速い



- ▶ ダークマターの小規模構造に影響を与える
(メリット or デメリット?)

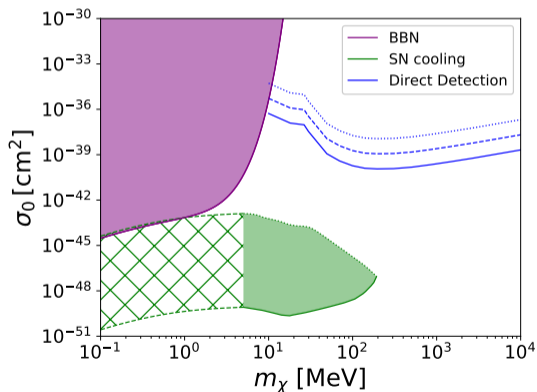
トークの目的

- ▶ $\chi e \rightarrow \chi e$ で XENON の結果を説明するモデルを考える；簡単のため以下の相互作用

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = G_{\chi e} (\bar{\chi} \gamma_{\mu} \chi) (\bar{e} \gamma^{\mu} e)$$

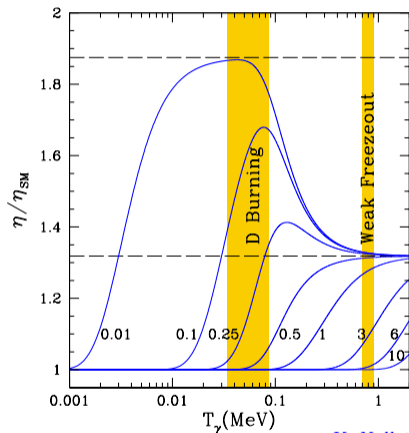
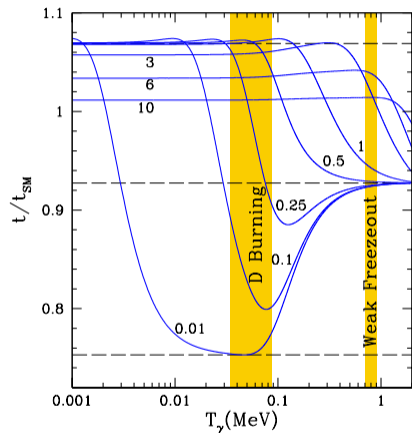
- ▶ 電子との相互作用からくる制限は？
 - ▶ ビッグバン元素合成 (BBN)
 - ▶ 星の冷却、特に超新星 (SN)
 - ▶ XENON S2-only
 - ▶ 宇宙の構造形成、 N_{eff} 、などなど
- ▶ 制限から逃れつつ、XENON 実験の結果を説明できるか？

$\sigma_0 = G_{\chi e}^2 \mu_{\chi e}^2 / \pi$: 非相対論的な $e\chi$ 散乱断面積



ビッグバン元素合成 (BBN)

BBN 前後 ($T \sim T_{\text{BBN}} \sim \mathcal{O}(1) \text{ MeV}$) に χ が熱浴中に存在することによる影響



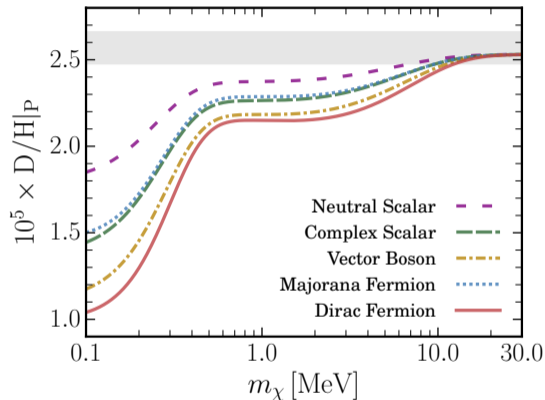
K. Nollett⁺ [1312.5725]

- ▶ 熱浴中の相対論的な χ が宇宙の膨張を早める
- ▶ χ が対消滅してプラズマを加熱

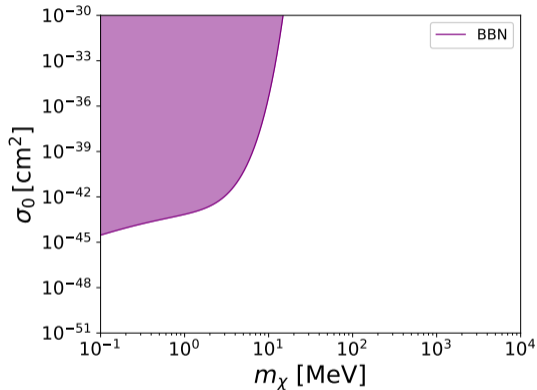
- ▶ χ の対消滅が Baryon-to-photon ratio η を変える

ビッグバン元素合成 (BBN)

$m_\chi \lesssim 10 \text{ MeV}$ のときが問題で、特に重水素の存在比 $D/H|_P$ が減少する効果が顕著



N. Sabti⁺ [1910.01649]



S. Chigusa⁺ [2007.01663]

観測値との矛盾を避けるため、 $T = T_{\text{BBN}}$ で χ が熱浴中にいない条件を課す

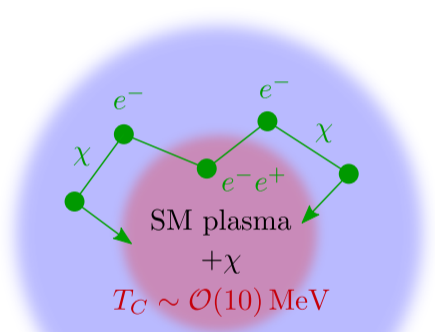
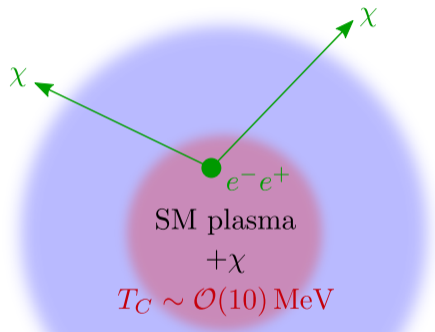
$$\left. \frac{\Gamma_{ee \rightarrow \chi\chi}}{H} \right|_{T=T_{\text{BBN}}} < 1$$

超新星 (SN) の冷却

超新星のコアで $e^-e^+ \rightarrow \bar{\chi}\chi$ を通じて作られた χ がエネルギーを持ち逃げする

▶ 十分作られるとき : $\sigma_{\min} < \sigma_0 < \sigma_{\max}$

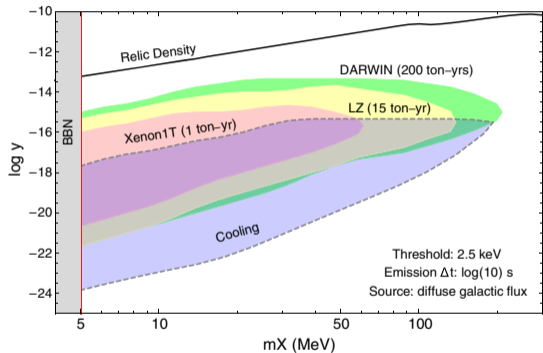
▶ Trapped Regime : $\sigma_0 > \sigma_{\max}$



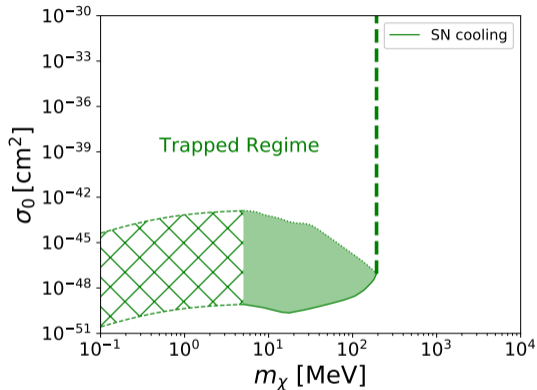
左の状況なら、 χ によって超新星の冷却曲線に影響が出て観測と矛盾するかも

超新星 (SN) の冷却

Monte Carlo シミュレーションの結果 (左図) を今回の模型に対する制限に焼き直す



W. DeRocco⁺ [1905.09284]



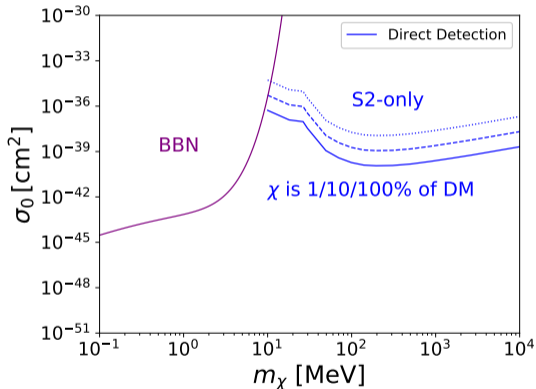
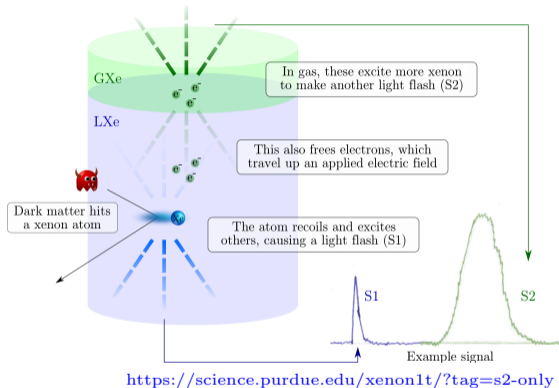
S. Chigusa⁺ [2007.01663]

シミュレーションによると、Trap には電子との散乱よりも (もしあれば) 陽子との散乱の方が効くらしい

- ▶ 電子と選択的に相互作用する模型では Trap される条件がもう少しゆるいかも?
- ▶ 詳細な調査にはシミュレーションが必要、ここでは保守的な線を引いている

XENON S2-only

χ が CDM の成分でもある場合 (例: Semi-annihilation 模型) ゆっくりな χ も XENON 実験で見えうる



- ▶ “S2-only analysis” で軽いダークマター由来の電子散乱事象を探れる

R. Essig [1703.00910]

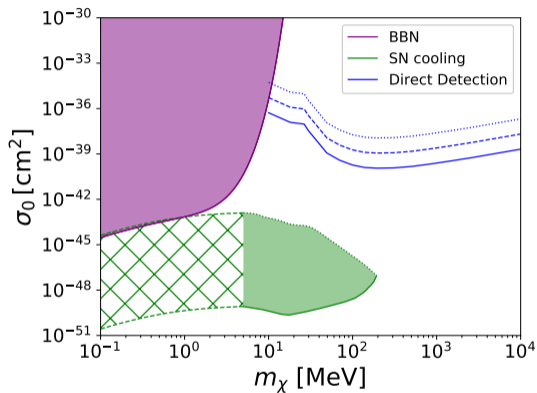
S. Chigusa⁺ [2007.01663]

XENON1T collaboration [1907.11485]

その他の制限 / 制限のまとめ

その他の制限

- ▶ ダークマターの間接探索： $\bar{\chi}\chi \rightarrow e^-e^+$
 $m_\chi \gtrsim 10 \text{ MeV}$ に直接探索より弱い制限
M. Boudaud⁺ [1612.07698]
- ▶ 銀河の形成 @ $T = T_s \sim 1 \text{ keV}$, $\dot{a}^{-1} \sim 10^2 \text{ kpc}$
弱い制限 (cf) S. D. McDermott⁺ [1011.2907]
- ▶ CMB： N_{eff} への影響を通じて
基本的に BBN より弱い制限 N. Sabti⁺ [1910.01649]

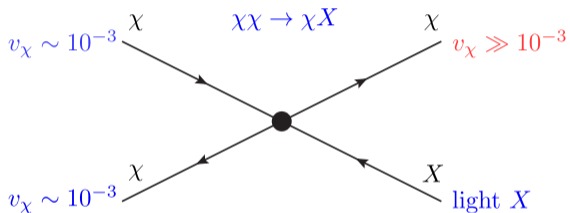


さて、これらの制限をクリアしつつ XENON 実験の結果を説明するモデルは？

なぜ速いのか？

現在の宇宙で加速：(例として) Semi-annihilation

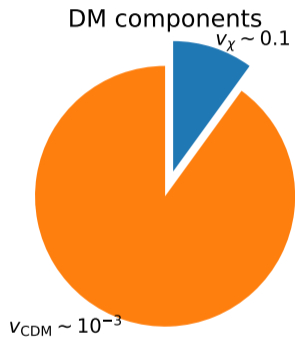
χ は CDM ($v_\chi \sim 10^{-3}$)



$$\gamma_\chi = \frac{5m_\chi^2 - m_X^2}{4m_\chi^2}, v_\chi \leq 0.6$$

B. Fornal⁺ [2006.11264]

ダークマターの一部が元から速い



- ▶ ダークマターの小規模構造に影響を与える
(メリット or デメリット?)

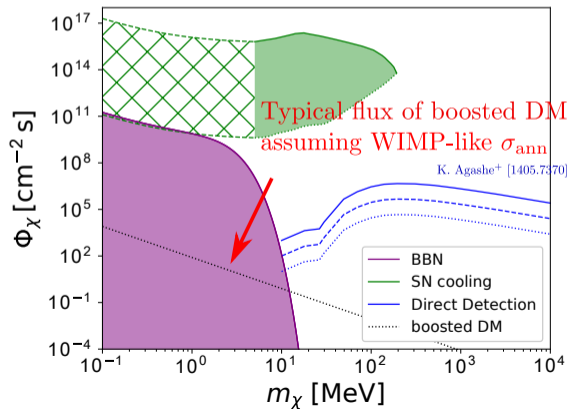
XENON 実験の解釈 1: χ が現在の宇宙で加速される

(観測された信号の大きさ) = (加速された χ のフラックス) \times (χe 散乱断面積) \times (観測時間) の関係式から、

$$\Phi_\chi \sim 5 \times 10^2 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \left(\frac{10^{-36} \text{ cm}^2}{\sigma_0} \right)$$

B. Fornal⁺ [2006.11264]

フラックスへの制限



妥当なモデルであるためには

- ▶ 何らかの理由でフラックスがかなり大きい?
- ▶ $m_\chi \gtrsim 10 \text{ MeV}$ の CDM ではないものが飛んできている?

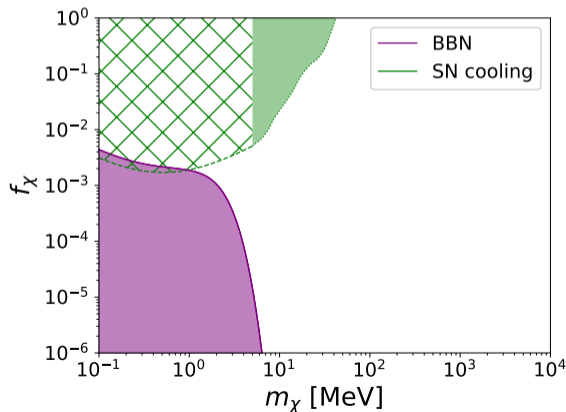
$\chi\chi \rightarrow \chi X$ の X の方とか?

XENON 実験の解釈 2 : ダークマターの速い成分 χ

(観測された信号の大きさ) \propto (ダークマターの総量) \times (χ の存在比 f_χ) \times (χe 散乱断面積) の関係式から、

$$f_\chi \sim \left(\frac{m_\chi}{\text{MeV}} \right) \left(\frac{10^{-46} \text{ cm}^2}{\sigma_0} \right)$$

存在比への制限



妥当なモデルであるためには

- ▶ $m_\chi \gtrsim 10 \text{ MeV}$ を持つ速い成分?
- ▶ 構造形成からの制限に注意
(初期宇宙で $f_{\text{relativistic}} \lesssim 0.1$)

M. Viel⁺ [astro-ph/0501562]

- ▶ CMB への影響を考慮

まとめ

- ▶ XENON 実験の結果を散乱で説明できる χe 相互作用の有効理論による解析
- ▶ BBN、SN の冷却、XENON S2-only analysis から相互作用の大きさに強い制限
- ▶ 大きく分けて 2 種類の模型
 - ▶ χ が現在の宇宙で加速される
大きなフラックスを持つ or $m_\chi \gtrsim 10 \text{ MeV}$ のダークマター以外のなにか
 - ▶ ダークマターの速い成分 χ
ほんの少し $m_\chi \gtrsim 10 \text{ MeV}$ を持つ成分が混ざっている