

銀河中で加速された暗黒物質の直接探索

佐藤 亮介



Y. Ema, F. Sala, R. Sato, 1811.00520, Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 181802

Y. Ema, F. Sala, R. Sato, 2011.01939, SciPost Phys. 10 (2021) 3, 072

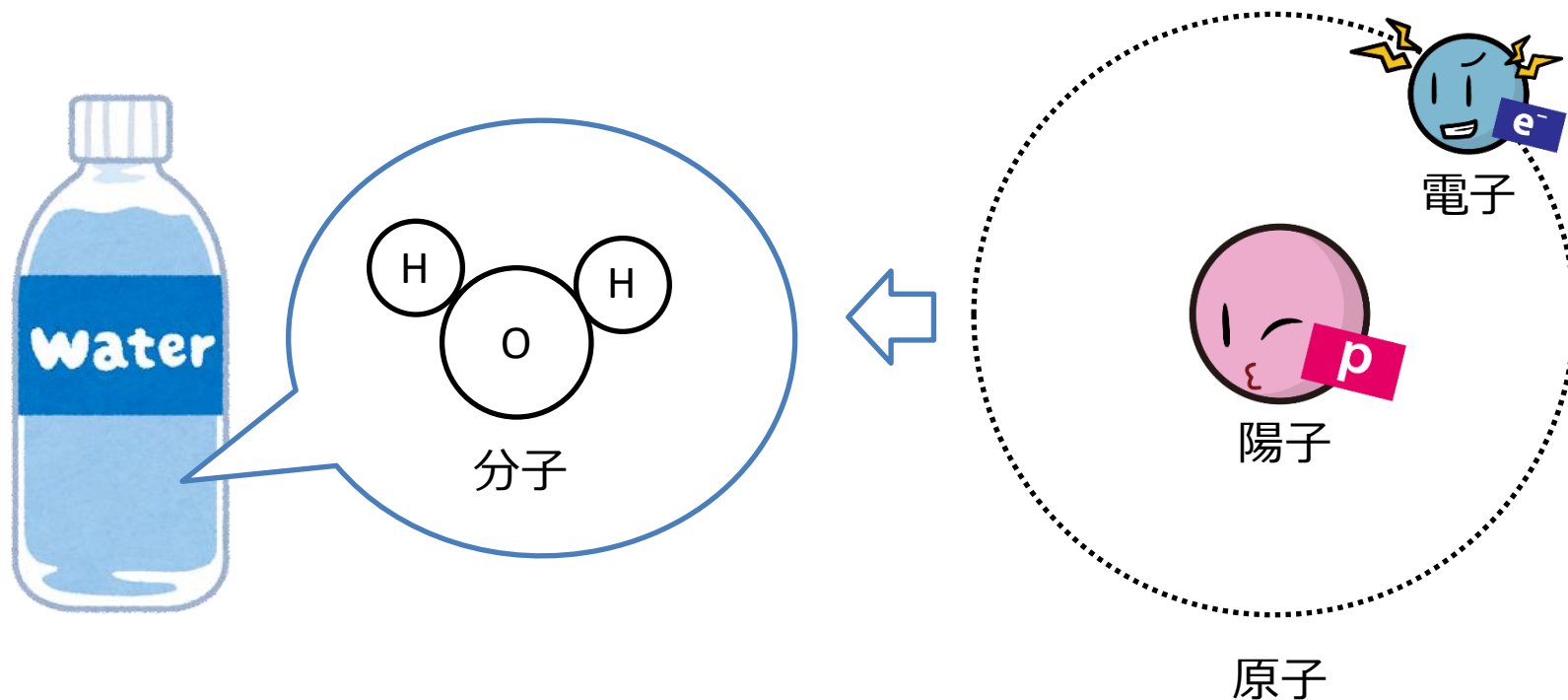
2023. 10. 31 @ 東京理科大学

今日の予定

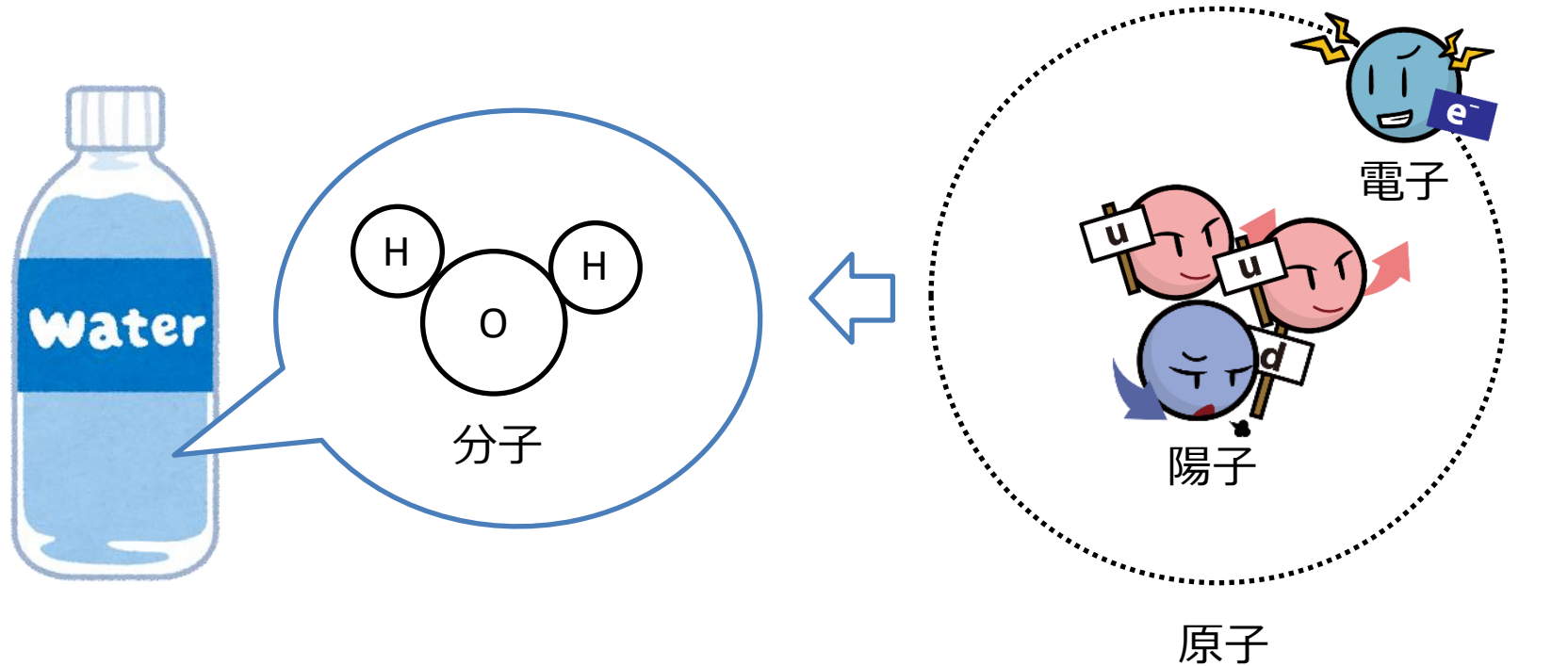
- 1. 暗黒物質と素粒子**
2. 暗黒物質探索実験と宇宙線
3. 宇宙線で加速された暗黒物質探索実験

1811.00520 + 2011.01939

物質は何からできているのか



物質は何からできているのか



陽子は3つのクォークから成る

原子や分子は、**素粒子（クォークと電子）の組み合わせ**でできている。

物質は何からできているのか

これまでに発見されている素粒子の一覧。（標準模型）



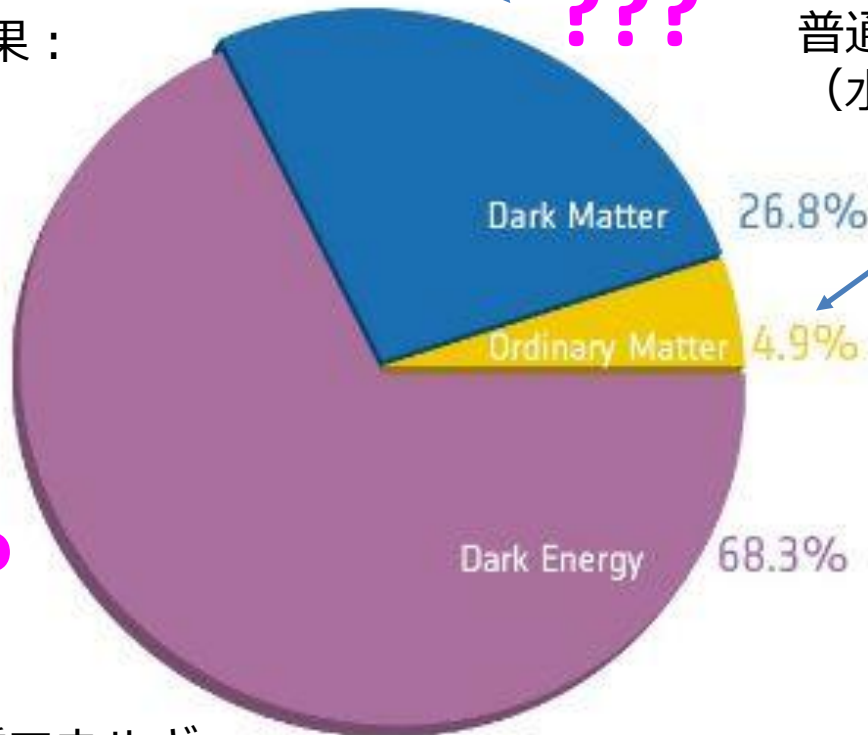
この宇宙は何からできているのか

現在の宇宙のエネルギーの**95%は謎**
現在の宇宙のエネルギーの約1/4は**暗黒物質**

PLANCK衛星の観測結果：

???

暗黒物質エネルギー



物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons		
クォーク quarks	u アップクォーク	c チャームクォーク	t トップクォーク	Y 光子 (フォトン)	電磁気力 electromagnetic force
	d ダウンクォーク	s ストレンジクォーク	b ボトムクォーク	g グルーオン	強い力 strong force
	e 電子	μ ミュー粒子	τ タウ粒子	Z, W [±] ウィークボソン	弱い力 weak force
レプトン leptons	ν _e 電子ニュートリノ	ν _μ ミューニュートリノ	ν _τ タウニュートリノ	H ヒッグス粒子	
				Higgs bosons ヒッグス粒子	

普通物質
(水素、ヘリウム、 etc)

[taken from <https://sci.esa.int/>]

暗黒物質がいる証拠の例

銀河は回転している。

円運動の遠心力と重力の力のつりあい

$$\underbrace{m \frac{v^2(r)}{r}}_{\text{遠心力}} = \underbrace{m \frac{d\Phi}{dr}}_{\text{重力}} \quad \Phi : \text{重力ポテンシャル}$$



[en.wikipedia.org]

$\Phi(r)$ は質量密度 $\rho(r)$ から計算できる。

$$\text{例) 球対称なら} \quad \Phi(r) = -G \int_0^r dr \, 4\pi^2 r \rho(r)$$

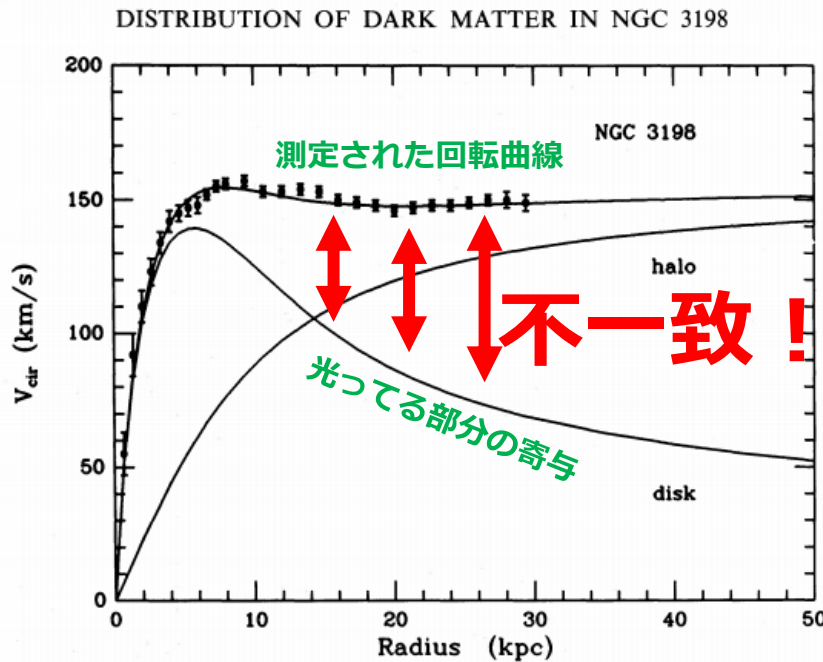
銀河の中の**星の動き**と**質量分布**が比較可能！

暗黒物質がいる証拠の例

銀河は回転している。



[en.wikipedia.org]



[Van Albada et al, 1985]

光っている星だけでは、どうも足りないみたいだ。

光っていない、重力相互するモノがいるはず。→ **暗黒物質**

暗黒物質がいる証拠

存在する証拠はたくさんあるが、その正体はまだよく分からない。



Contents [hide]	
1	History
1.1	Early history
1.2	1970s
2	Technical definition
3	Observational evidence
3.1	Galaxy rotation curves
3.2	Velocity dispersions
3.3	Galaxy clusters
3.4	Gravitational lensing
3.5	Cosmic microwave background
3.6	Structure formation
3.7	Bullet Cluster
3.8	Type Ia supernova distance measurements
3.9	Sky surveys and baryon acoustic oscillations
3.10	Redshift-space distortions
3.11	Lyman-alpha forest
4	Composition of dark matter: baryonic vs. nonbaryonic
4.1	Baryonic matter
4.2	Non-baryonic matter

[en.wikipedia.org/wiki/Dark_matter]

わかってる性質は超ざっくり。

- 電荷は持たない
- 通常の物質との相互作用は弱い
- 運動する速度が光速よりずっと遅い

暗黒物質は未知の素粒子かも

未知の素粒子は暗黒物質の有力候補。



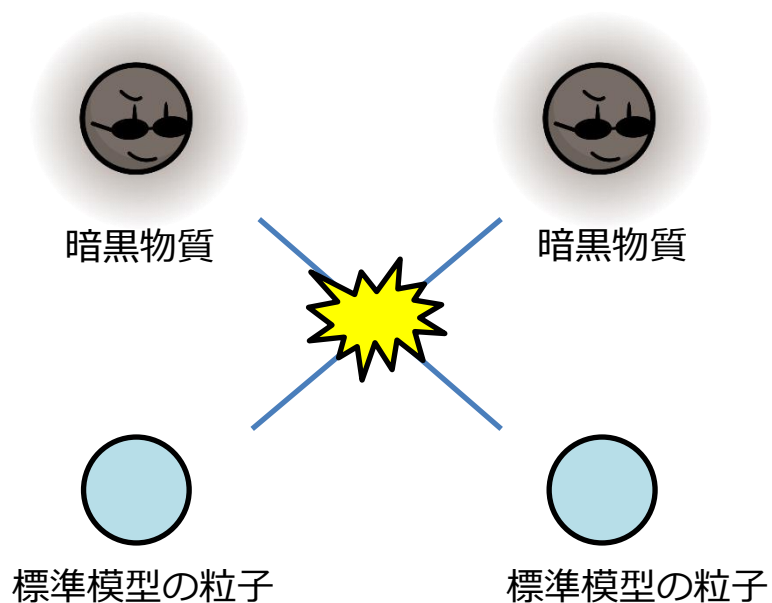
+

???

???

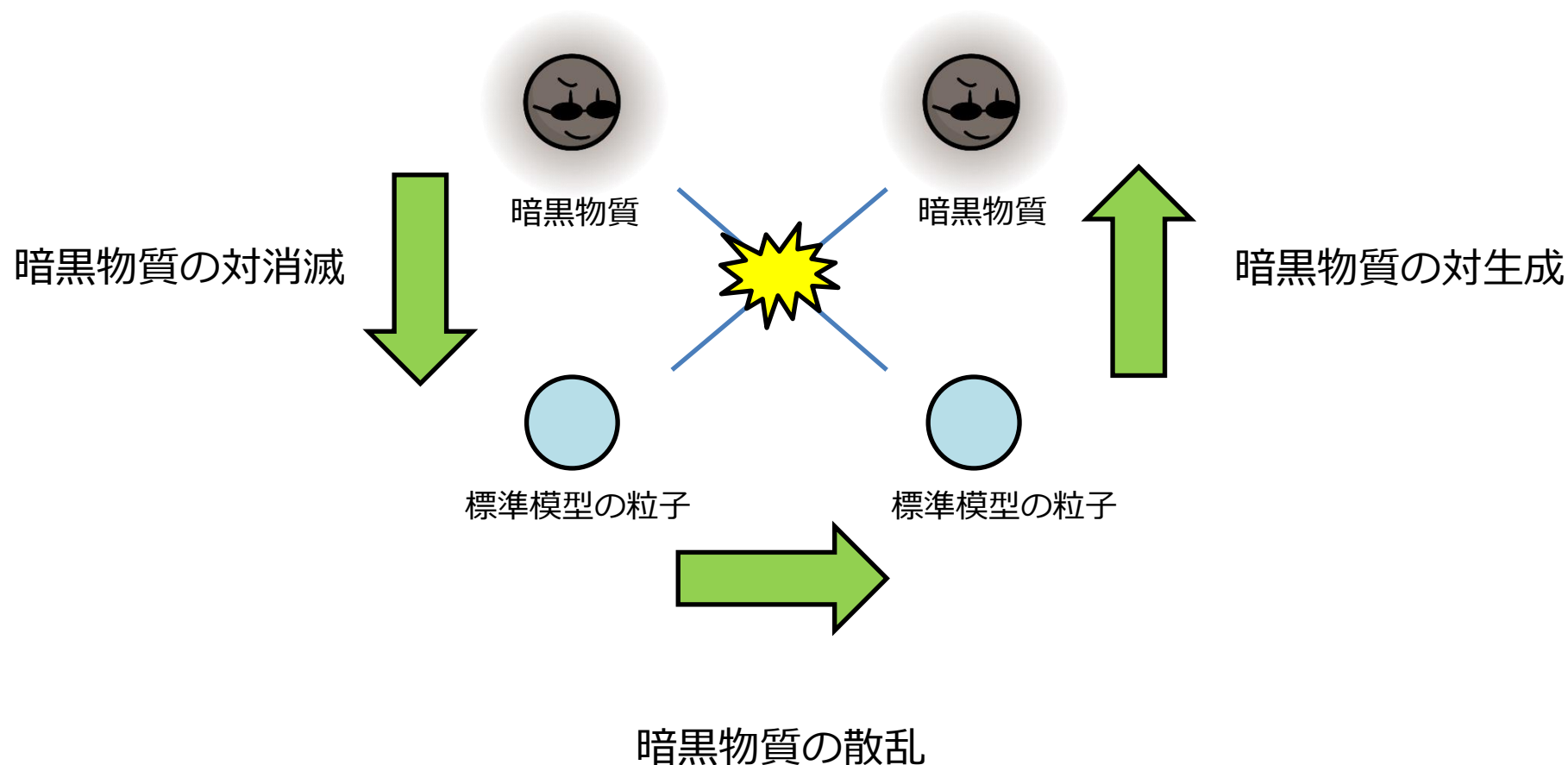
暗黒物質の探し方

もしかしたら、暗黒物質と普通の物質はちょっとだけ相互作用してるかも？



暗黒物質の探し方

もしかしたら、暗黒物質と普通の物質はちょっとだけ相互作用してるかも？



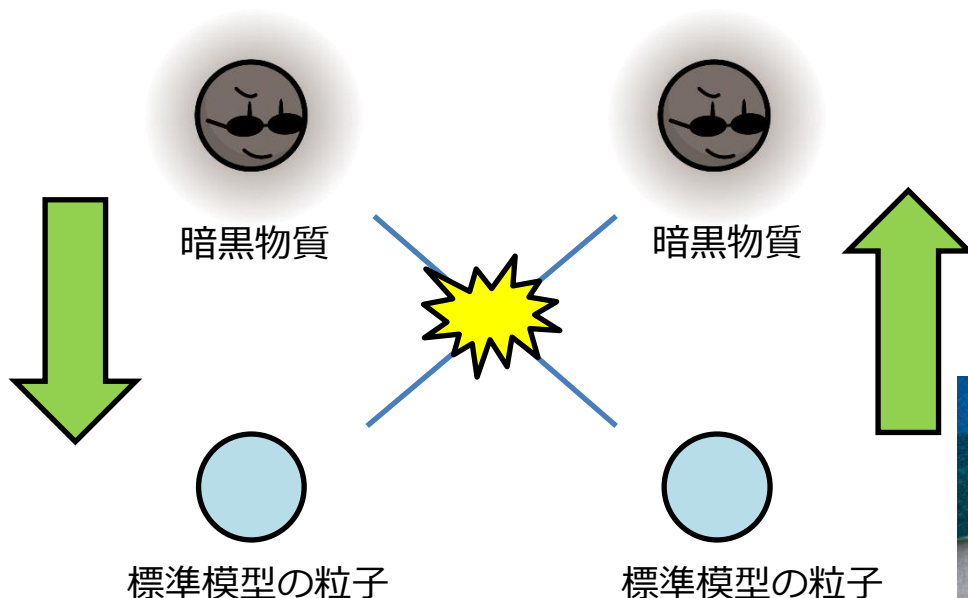
暗黒物質の探し方

もしかしたら、暗黒物質と普通の物質はちょっとだけ相互作用してるかも？

宇宙線の観測



[ams.nasa.gov]



暗黒物質

暗黒物質

標準模型の粒子

標準模型の粒子

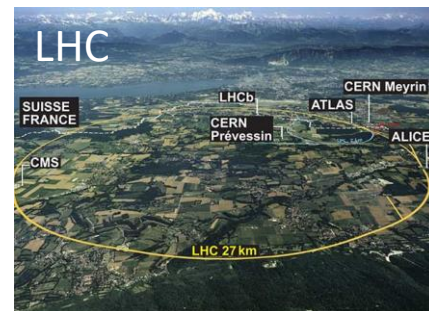
直接探索実験



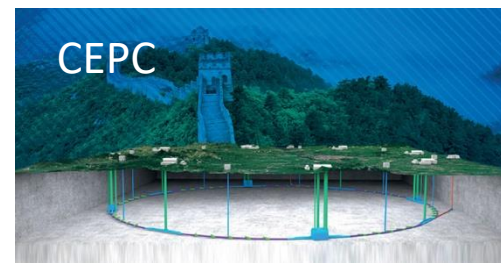
[pandax.sjtu.edu.cn]



[xenon1t.org]



[www.aps.org]



[CERN Courier]

加速器実験

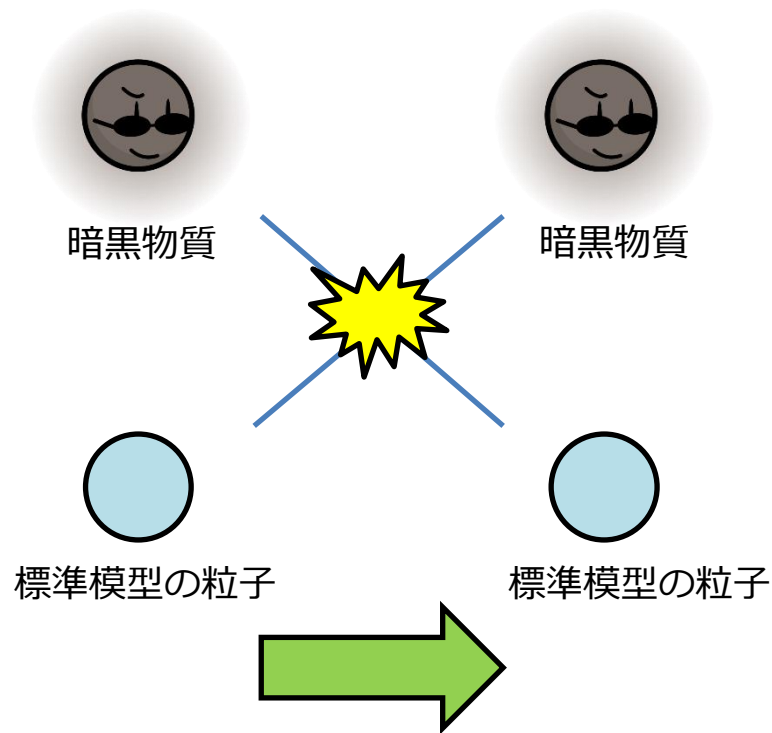
今日の予定

1. 暗黒物質と素粒子
- 2. 暗黒物質探索実験と宇宙線**
3. 宇宙線で加速された暗黒物質探索実験

1811.00520 + 2011.01939

暗黒物質の直接探索実験

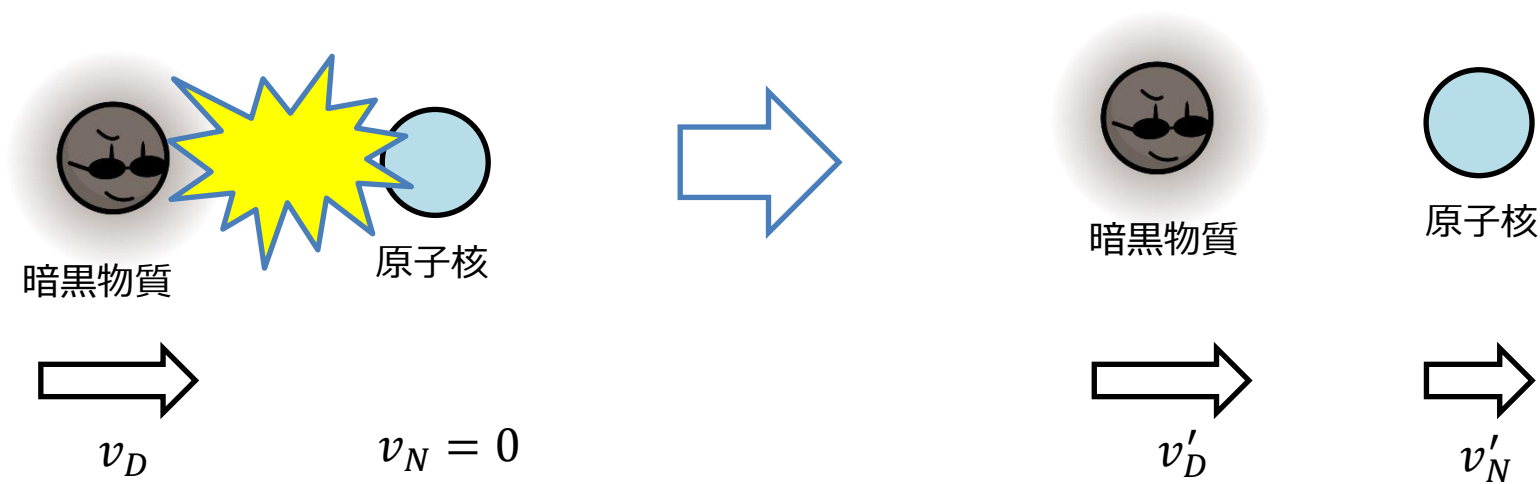
もしかしたら、暗黒物質と普通の物質はちょっとだけ相互作用してるかも？



地球に飛来する暗黒物質の典型的な速度は、200 km/s程度。

暗黒物質が、たまに、原子核とかを蹴飛ばす。 → 反跳エネルギーを捉える

暗黒物質と原子核の散乱



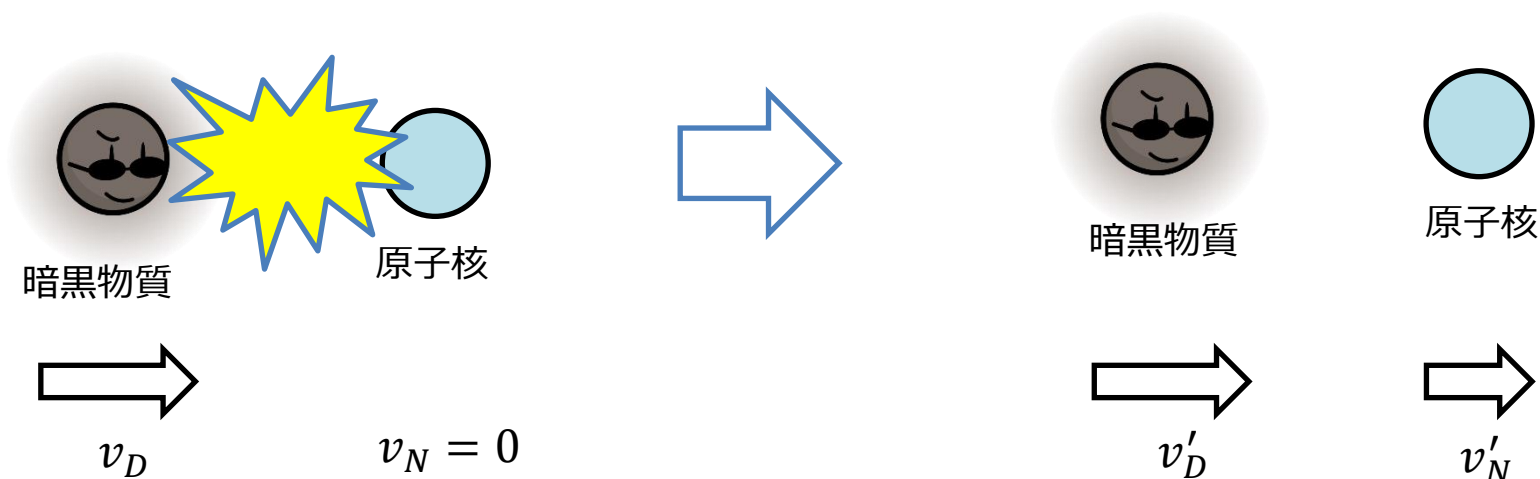
エネルギー・運動量保存から、

$$\frac{1}{2}m_D v_D^2 = \frac{1}{2}m_D v_D'^2 + \frac{1}{2}m_N v_N'^2 \quad (\text{エネルギー保存})$$

$$m_D v_D = m_D v_D' + m_N v_N' \quad (\text{運動量保存})$$

$$\Rightarrow v_N' = \frac{2m_D v_D}{m_D + m_N}$$

暗黒物質と原子核の散乱



エネルギー運動量保存から、

$$E'_N = \frac{1}{2} m_N v_N'^2 = \frac{m_D^2}{(m_D + m_N)^2} \times 2m_N v_D^2$$

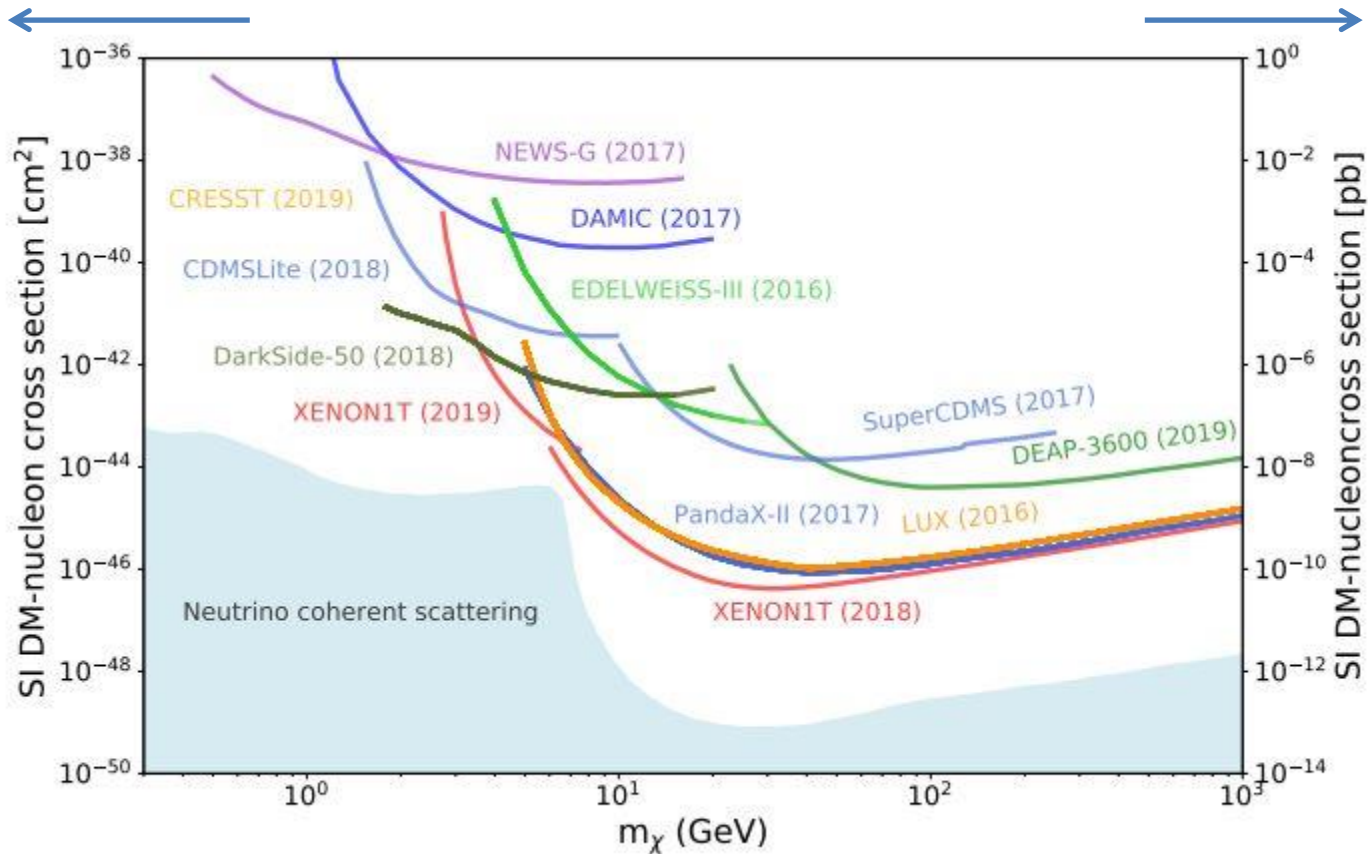
$$\left\{ \begin{array}{ll} m_D \gg m_N \longrightarrow E'_N \simeq 2m_N v_D^2 \sim 0(\text{keV}) \\ m_D \ll m_N \longrightarrow E'_N \simeq \frac{2m_{DM}^2}{m_N} v_D^2 \end{array} \right.$$

m_D 小さい $\rightarrow$ 反跳エネルギー (E'_N) 小さい

原子核との散乱による実験結果のまとめ

反跳エネルギー小さい

散乱の頻度 $\propto n_{DM} = \frac{\rho_{DM}}{m_{DM}}$



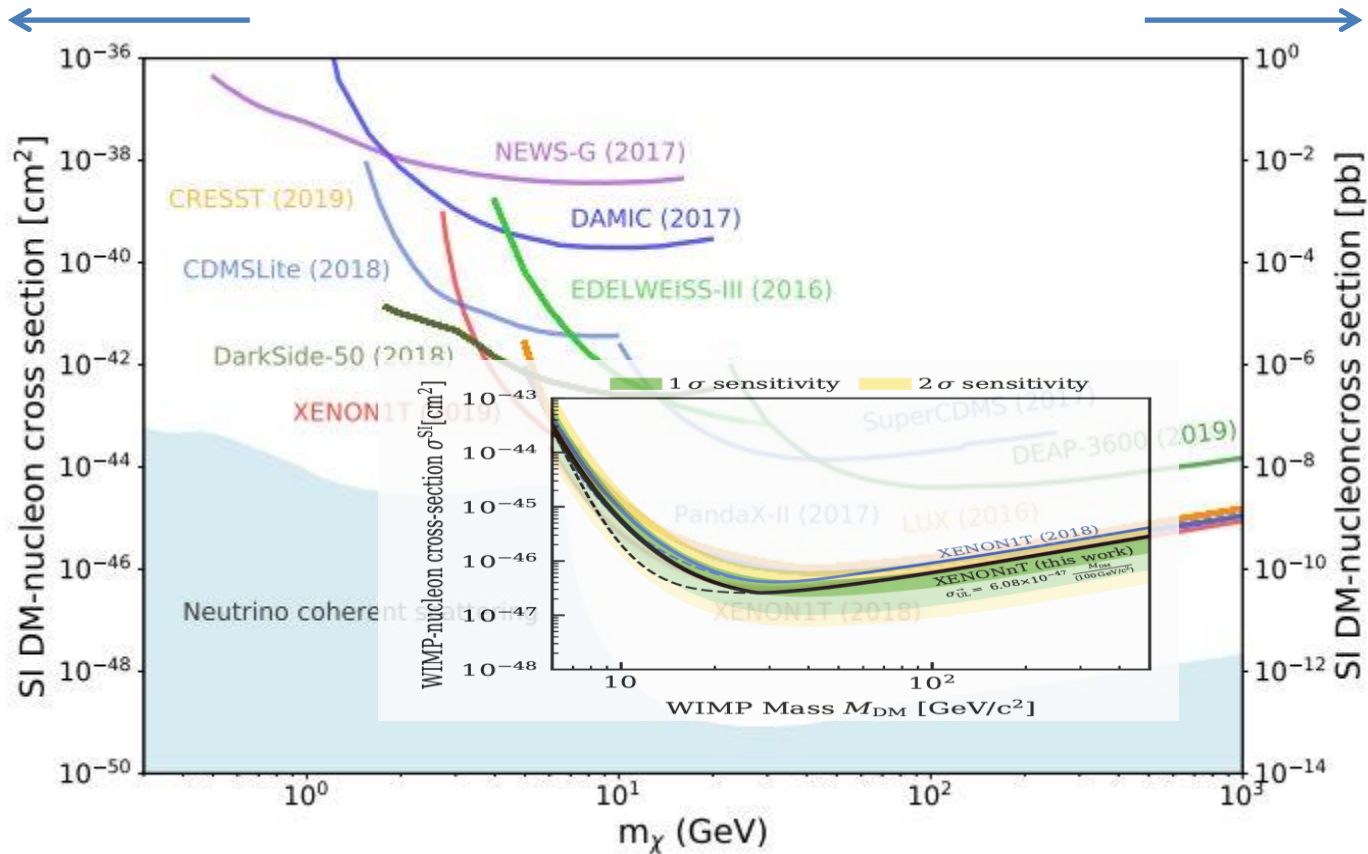
[<https://pdg.lbl.gov/2020/reviews/rpp2020-rev-dark-matter.pdf>]

原子核より軽い暗黒物質は、制限がよわよわ。

原子核との散乱による実験結果のまとめ

反跳エネルギー小さい

散乱の頻度 $\propto n_{DM} = \frac{\rho_{DM}}{m_{DM}}$



[<https://pdg.lbl.gov/2020/reviews/rpp2020-rev-dark-matter.pdf>]
[XENONnT, arXiv:2303.14729]

原子核より軽い暗黒物質は、制限がよわよわ。

軽い暗黒物質をどうやって調べる？

- 反跳エネルギー小さくても検出できる実験をする

- 電子との散乱 [Essig, Mardon, Volansky (2011)]
- Breaking of chemical-bond [Essig, Mardon, Slone, Volansky (2016)]
- ...

- 運動エネルギーの大きい暗黒物質を使う ($v \gg 300 \text{ km/s}$)

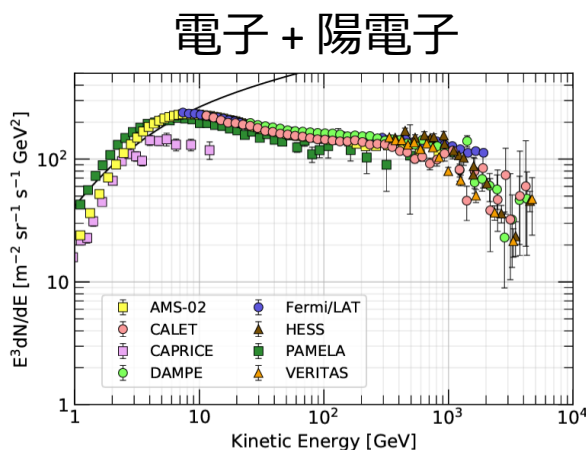
- 重い粒子の崩壊/対消滅 [Agashe, Cui, Necib, Thaler (2014)]
- 太陽の内部で加速される [An, Pospelov, Pradler, Ritz (2017)]
- 宇宙線との散乱による加速 [Cappiello, Ng, Beacom (2018)]
[Bringman, Pospelov (2018)]
[Ema, Sala, Sato (2018)]

- (他にもアイデアあるかも？)

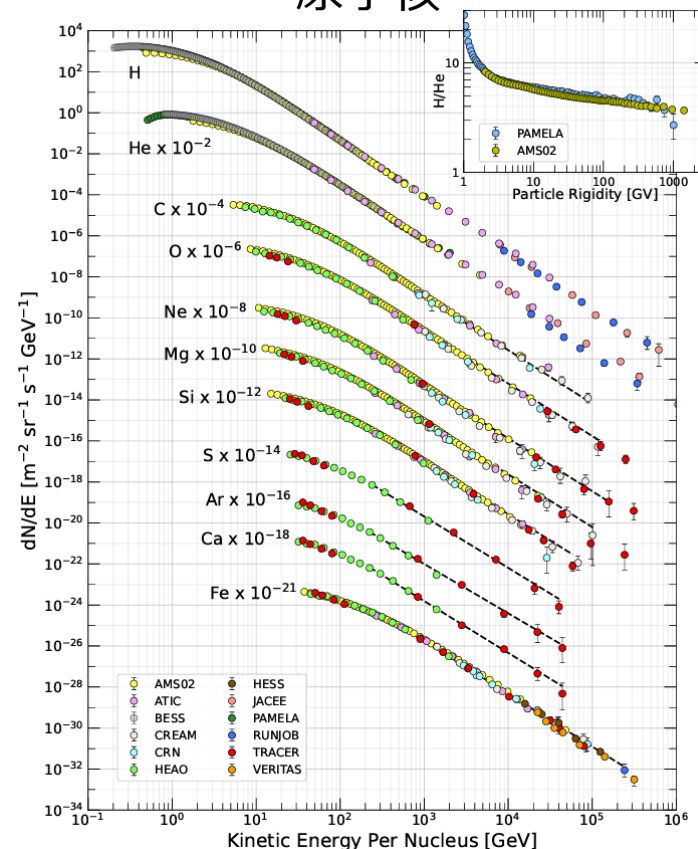
宇宙線

宇宙空間をとびまわる高いエネルギーを持った粒子。
地球に降り注ぐのが観測されている。

- 陽子 + 原子核 (p , He, B, C, N, O, ...)
- 反陽子 ($\bar{p}$)
- 電子 (e^-)
- 陽電子 (e^+)
- ガンマ線 (γ)
- ニュートリノ (ν)
- など



原子核



[<https://pdg.lbl.gov/2022/reviews/rpp2022-rev-cosmic-rays.pdf>]

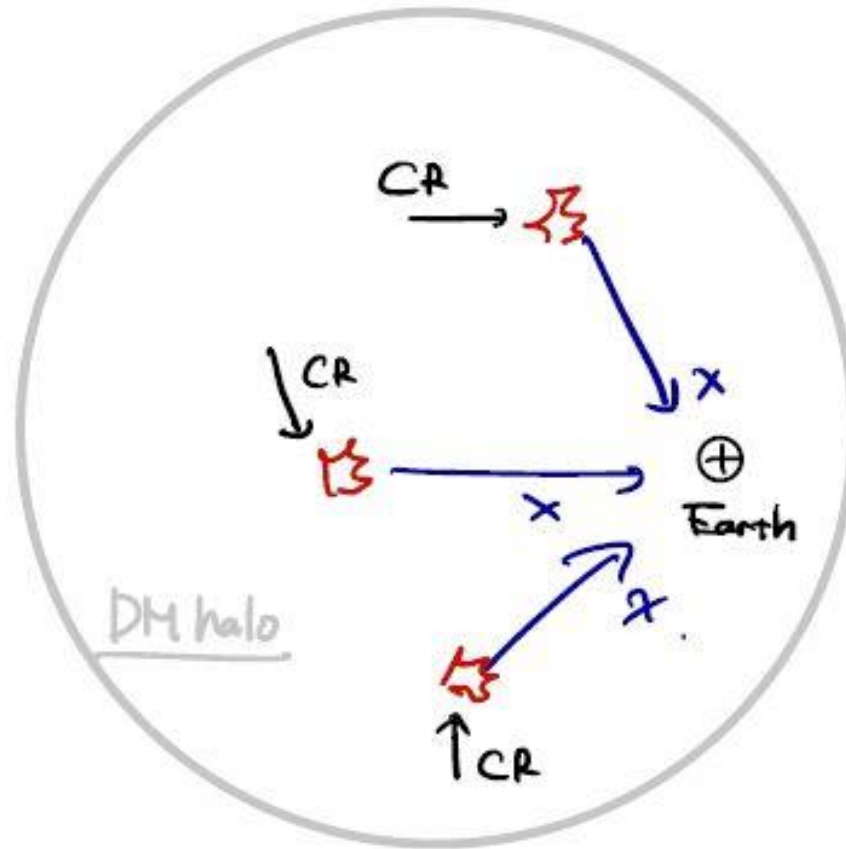
ExponentialじゃなくてPower law → 高エネルギーの粒子もそれなりにある。

銀河の様子

ガス状に分布する暗黒物質
(Dark matter halo)



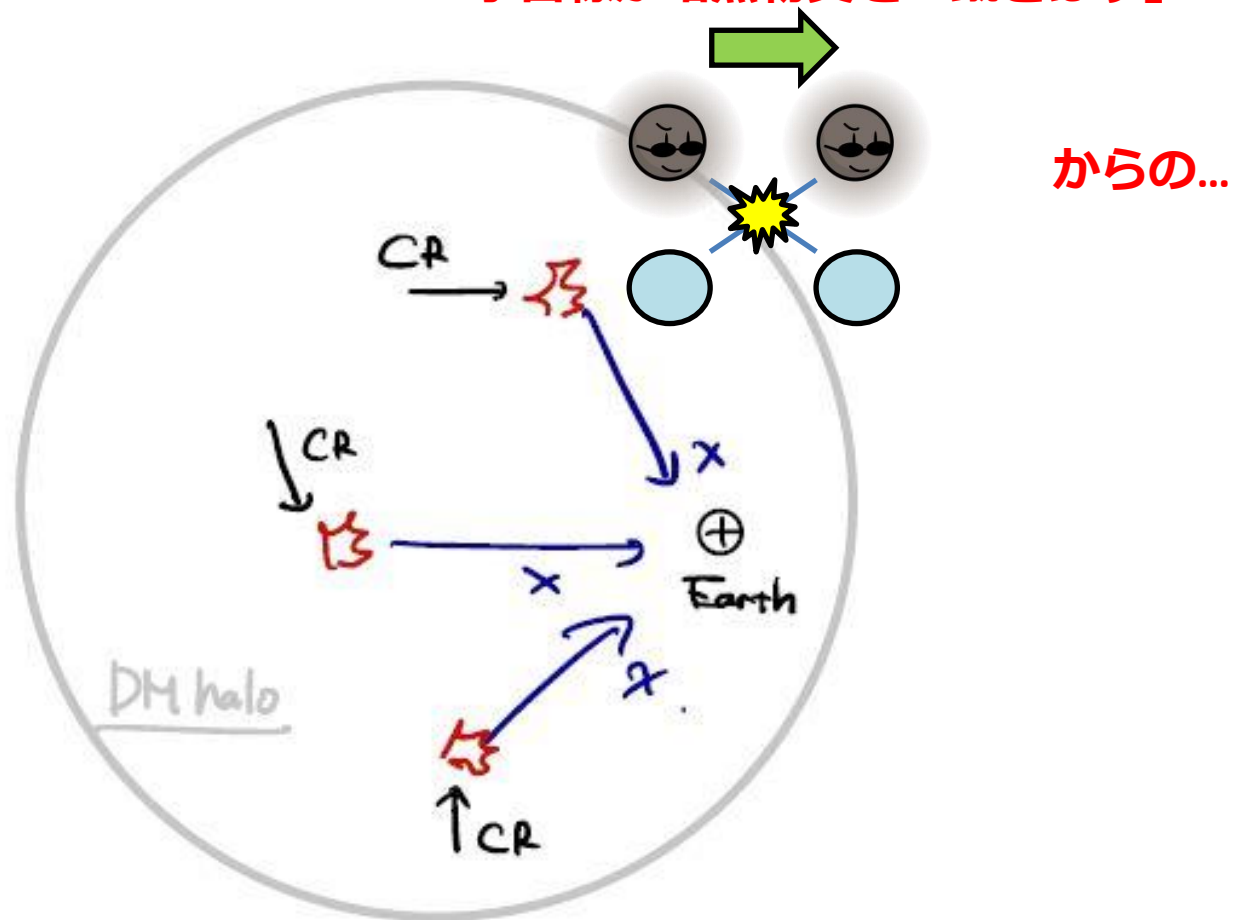
宇宙線に加速してもらおう



[from Y. Ema in GGI workshop 2019]

宇宙線に加速してもらおう

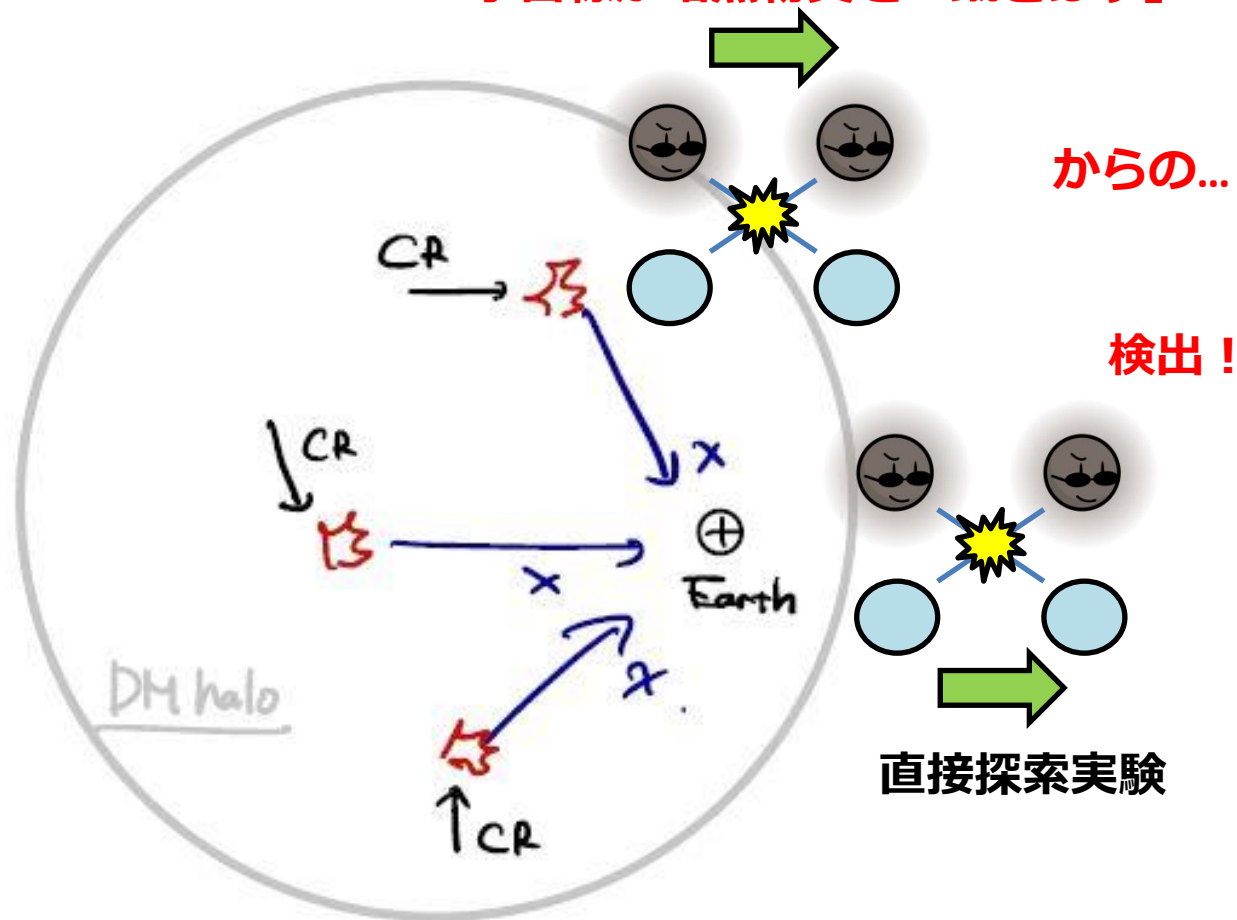
宇宙線が暗黒物質を「蹴とばす」



[from Y. Ema in GGI workshop 2019]

宇宙線に加速してもらおう

宇宙線が暗黒物質を「蹴とばす」



[from Y. Ema in GGI workshop 2019]

今日の予定

1. 暗黒物質と素粒子
2. 暗黒物質探索実験と宇宙線
3. 宇宙線で加速された暗黒物質探索実験

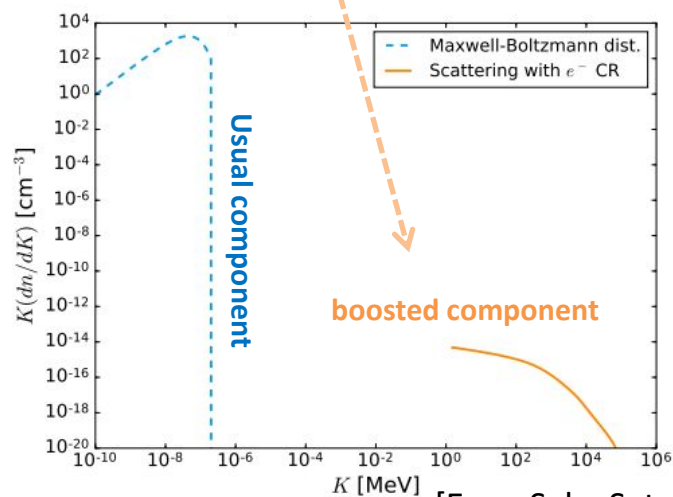
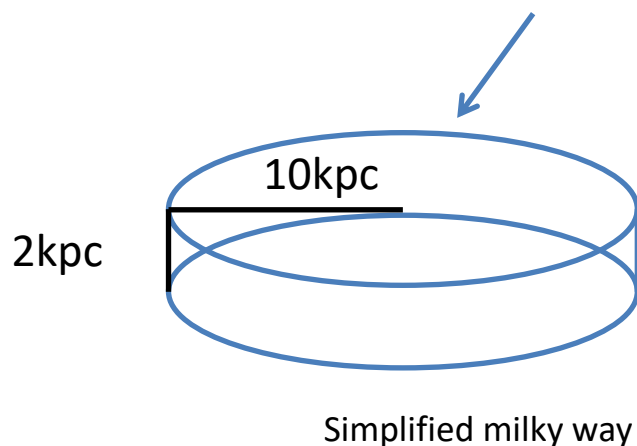
1811.00520 + 2011.01939

加速される暗黒物質

銀河内で、暗黒物質が宇宙線との散乱で、加速される。

地球に飛来するflux :

$$\frac{d\phi_{DM}}{d\Omega} = \frac{1}{M_{DM}} \underbrace{\left(\int d\ell \rho_{DM} \right)_{l.o.s}}_{\text{J-factor}} \times \underbrace{\int dK_{CR} \frac{d\phi_{CR}}{d\Omega} \frac{d\sigma}{dK_{\chi}}}_{\text{Scattering}} (CR\chi \rightarrow CR\chi)$$



[Ema, Sala, Sato (2018)]

J-factor

- J -factor in general characterizes astrophysical part:

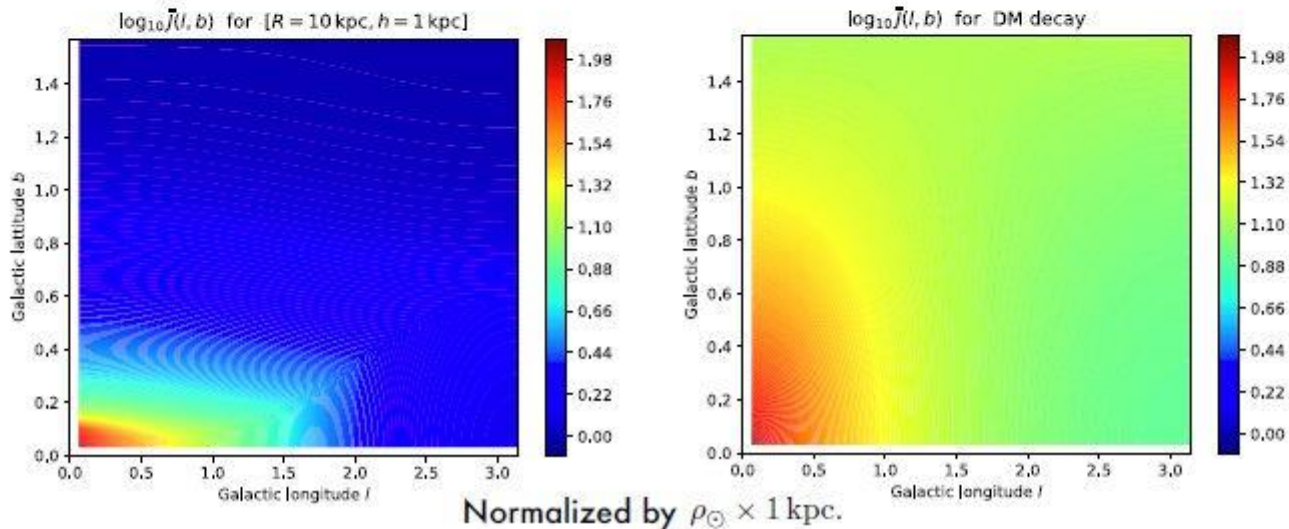
e.g. $J \propto \int_{\text{l.o.s}} dL \rho_\chi^2$ for DM annihilation, and $J \propto \int_{\text{l.o.s}} dL \rho_\chi$ for DM decay.

- In our case, J -factor is given by

$$J(l, b) = \int_{\text{l.o.s}} dL \rho_\chi, \text{ but the integral is only within the cylinder.}$$

➡ More angular dependence than DM decay.

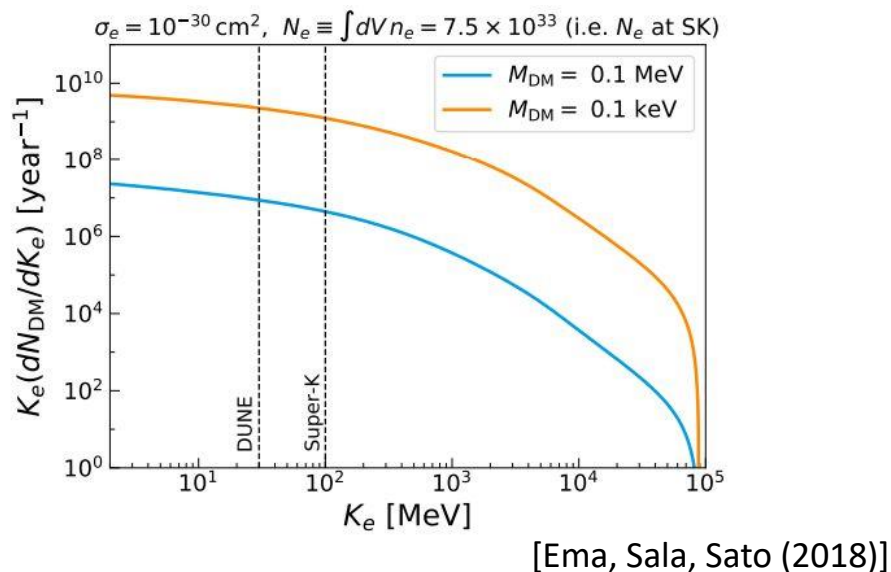
* In reality, CR profile should also matter.



[slide by Y. Ema in GGI workshop 2019]

検出器でのrecoil energy

電子のrecoil energy spectrum



比較的recoil energyが大きいので、**threshold energy**はO(10-100) MeVでOK。
ニュートリノ実験につかうような**大きな検出器が有利**。

SuperKとMinibooneにelectronと相互作用するboosted DM searchあり

Earth attenuation

実験施設は、 $O(1 - 10^3)\text{m}$ くらいの深さに埋まっている。
地球の裏側からくるDMは、 10^4km くらいの厚さを抜けてくる。

Cross sectionがこれ以下なら透明

$n \sim 10^{24}\text{cm}^{-3}$	$z \sim 1\text{m}$	$\longrightarrow$	$(nz)^{-1} \sim 10^{-26}\text{cm}^2$
地球の核子/電子密度	$z \sim 10^4\text{km}$ 地球の大きさ	$\longrightarrow$	$(nz)^{-1} \sim 10^{-33}\text{cm}^2$

- エネルギー損失は平均値を使う
- Deflectionは無視（進行方向は変わらないとする）
- 地球内部の密度は一定とする

DM粒子の運動エネルギーの変化：

$$\frac{dK_\chi}{dz} = -n \int dK \ K \frac{d\sigma}{dK} (K_\chi(z), K)$$

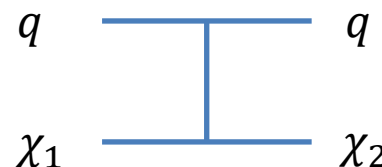
通常のdirect detectionと比較まとめ

- 通常のdirect detection

- $v_{DM} \sim 10^{-3}$
- 軽いDMでは、Recoil energyが m_{DM}/m_N でsuppress

- Direct detection w/ CR upscattering

- $v_{DM} \simeq c$
- 最終的なRecoil energyは、CRのenergyで（だいたい）決まる
- 軽いと数密度が増えるので、fluxも増える
- Inelastic scattering dark matterにもsensitivityあり



w/ $m_{\chi_2} - m_{\chi_1} > 0(\text{keV})$

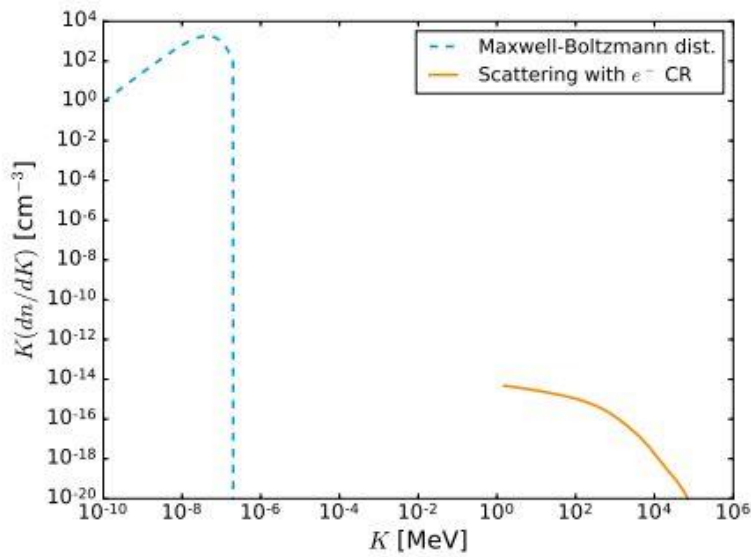
電子との散乱

1811.00520, PRL122 (2019) 181802

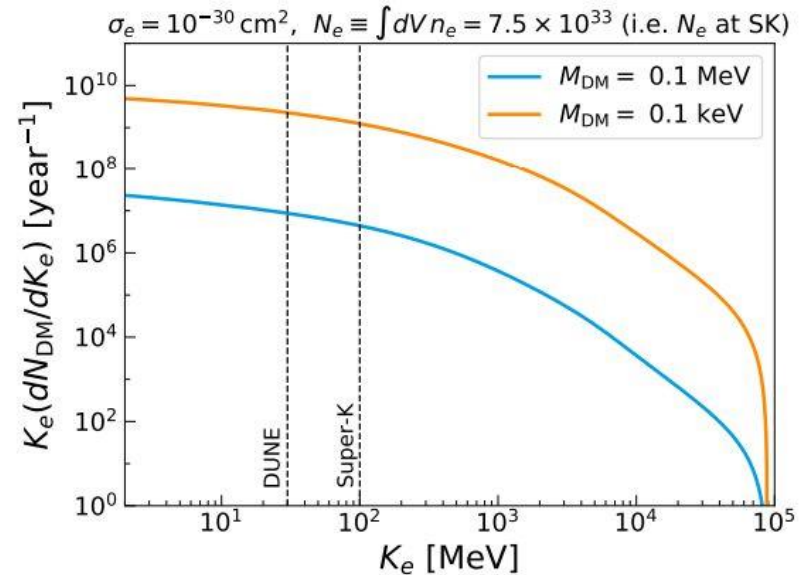
電子との散乱

e – DM scatteringは、s-waveで、
Cross sectionはエネルギー依存性なしと仮定。

DMのspectrum ($m = 0.1$ MeV)

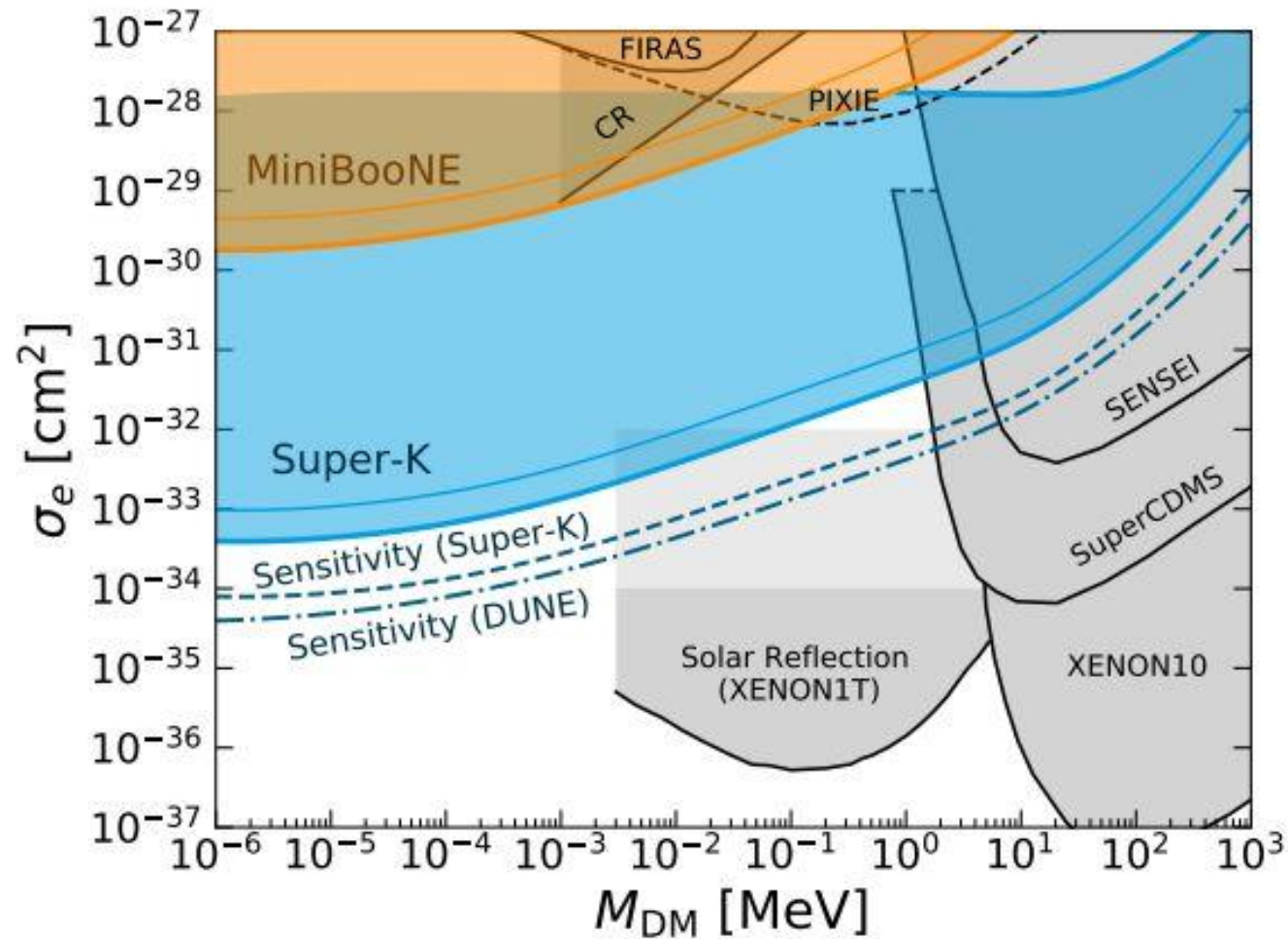


Recoil energyのspectrum



[Ema, Sala, Sato (2018)]

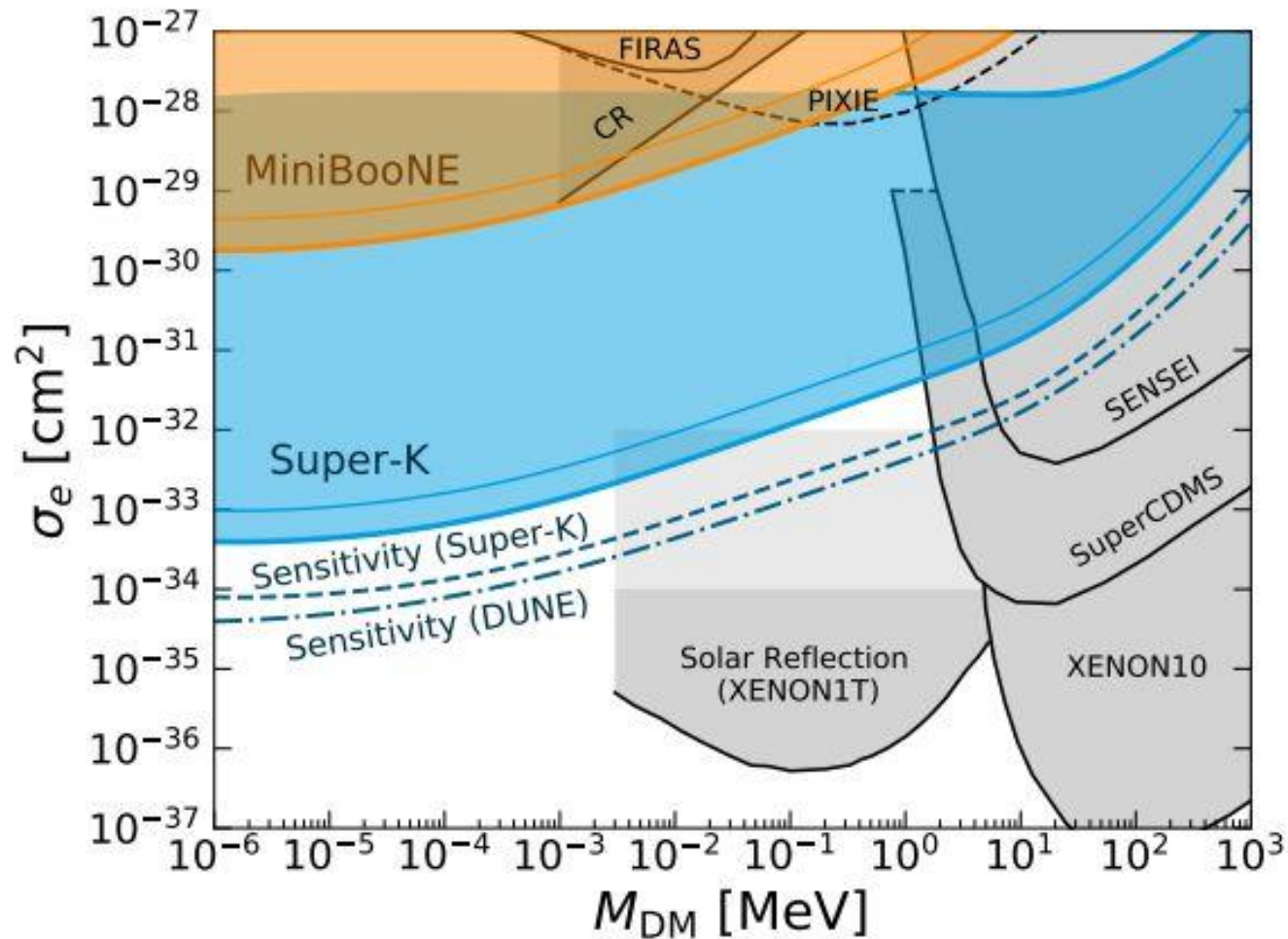
Result



[Ema, Sala, Sato (2018)]

Result

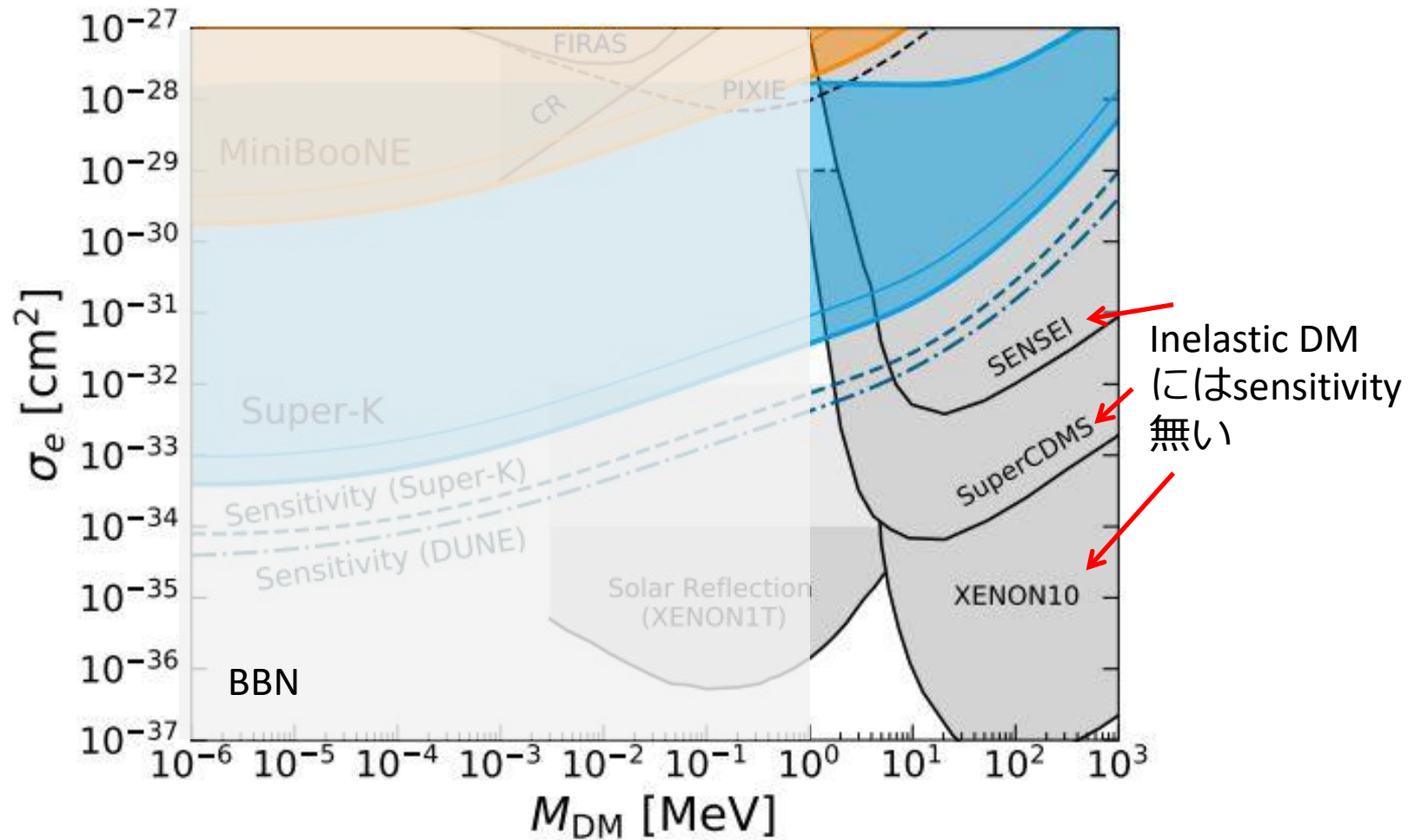
SuperKは深さが0(km)、MiniBooNEは0(m)
 σ_e が大きすぎると、SuperKにはかからなくなる。



[Ema, Sala, Sato (2018)]

Result

SuperKは深さが0(km)、MiniBooNEは0(m)
 σ_e が大きすぎると、SuperKにはかからなくなる。



[Ema, Sala, Sato (2018)]

核子との散乱

2011.01939

Benchmark model

χ はlight quark(u, d, s)とcoupleする。

$$\mathcal{L}_\phi = g_{\chi\phi} \bar{\chi}\chi\phi + g_{q\phi} \bar{q}q\phi,$$

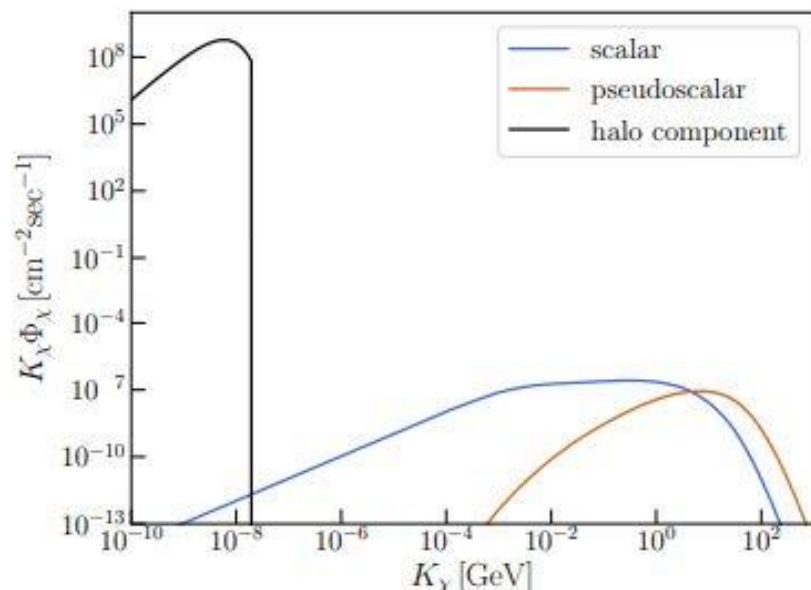
$$\mathcal{L}_a = g_{\chi a} \bar{\chi}i\gamma_5\chi a + g_{qa} \bar{q}i\gamma_5q a,$$

他の制限

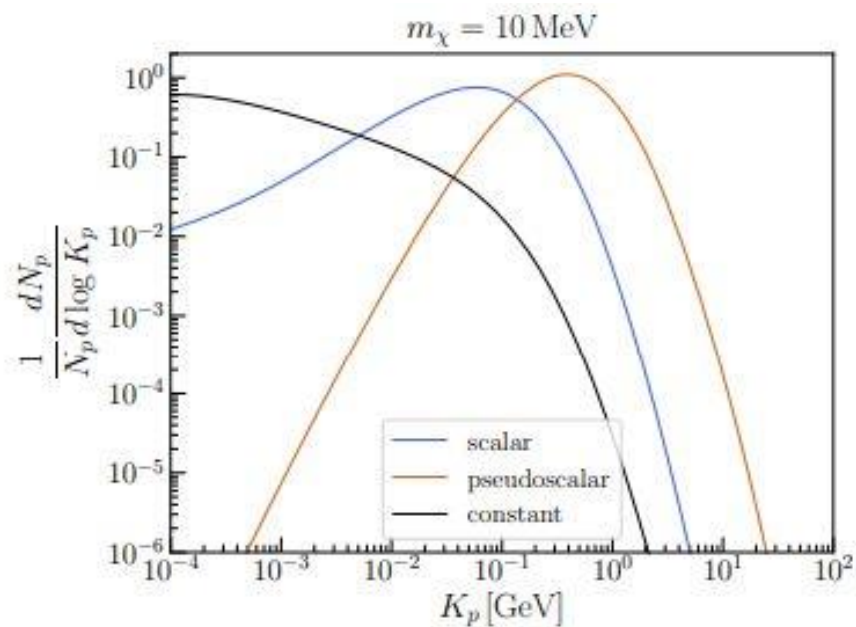
- Direct detection (scalarはtree、 pseudoscalarはone-loop)
[See, e.g., Abe, Fujiwara, Hisano (2018)]
- LHCのmono-jet search
- Mesonのinvisible decay (pseudoscalar mediatorのみ)
- BBN

核子との散乱

DMのspectrum ($m = 10$ MeV)

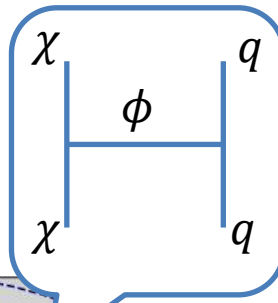
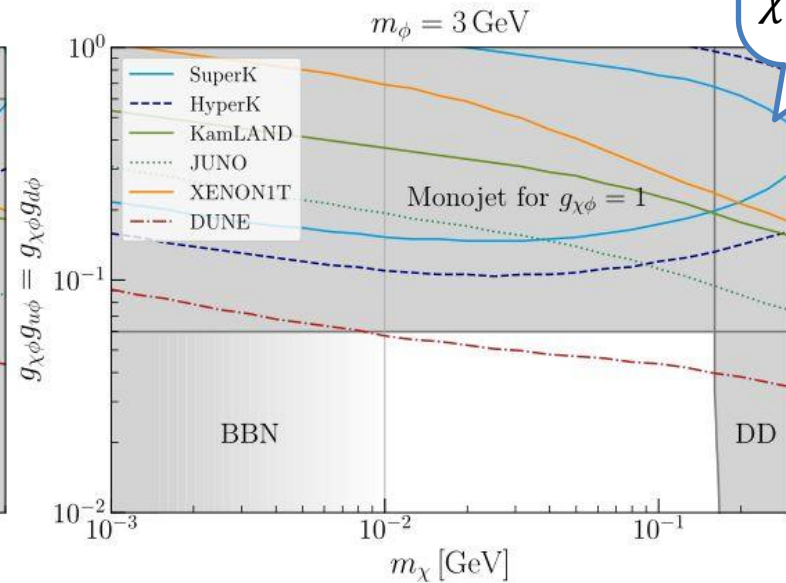
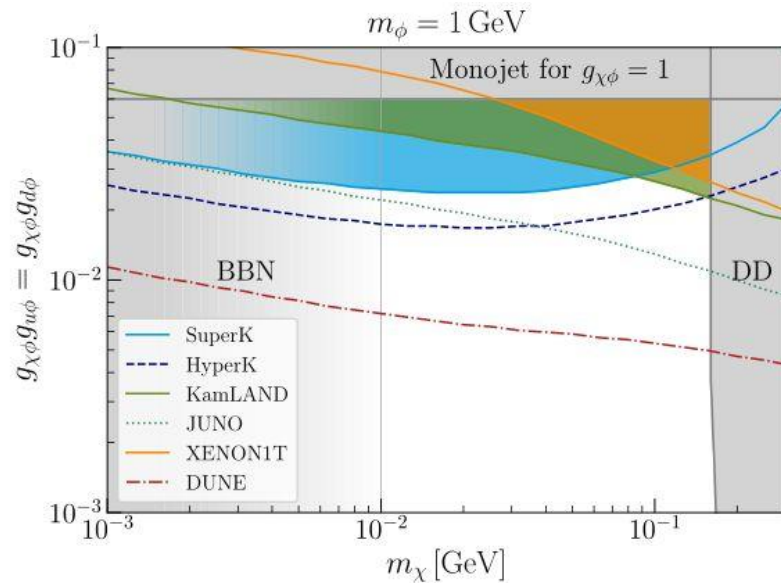


Recoil energyのspectrum



[Ema, Sala, Sato (2020)]

Scalar mediator



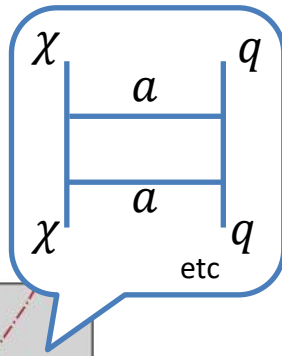
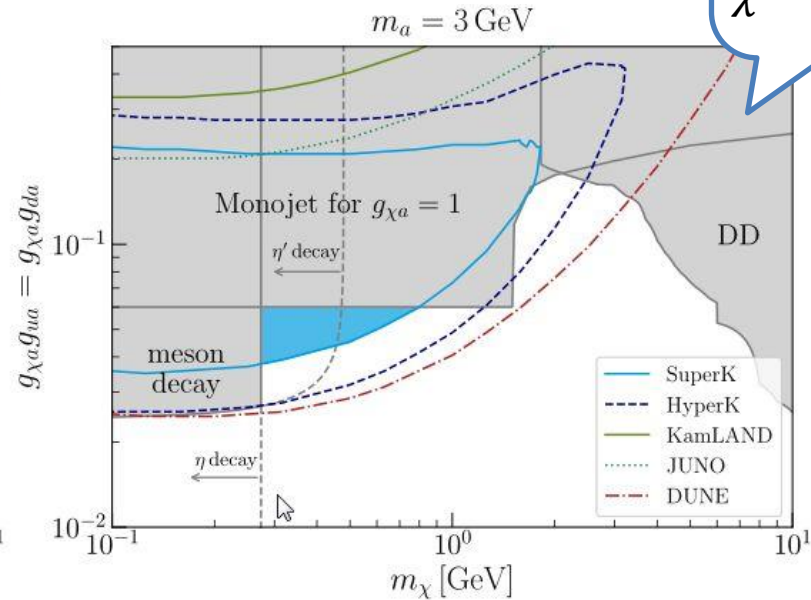
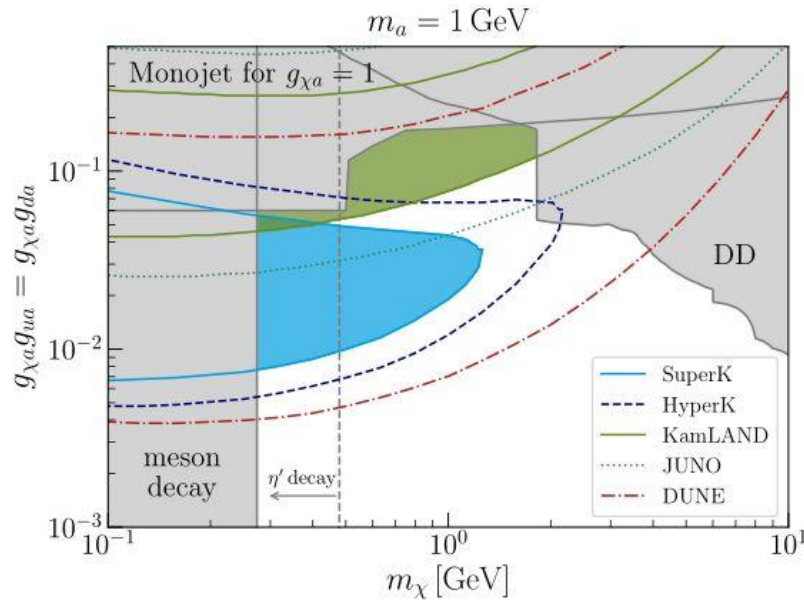
[Ema, Sala, Sato (2020)]

DD = NEWS-G + DarkSide-50 + CDMSlite + CRESST-III + XENON1T(S2only & S1+S2)

Monojet : one-jet + MET can be obtained from, e.g. $q\bar{q} \rightarrow g\phi(\rightarrow \chi\chi)$

BBN bound : $m_\chi > 1 - 10 \text{ MeV}$ (depending on the detail of DM coupling)

Pseudoscalar mediator



[Ema, Sala, Sato (2020)]

DD = NEWS-G + DarkSide-50 + CDMSlite + CRESST-III + XENON1T(S2only & S1+S2)

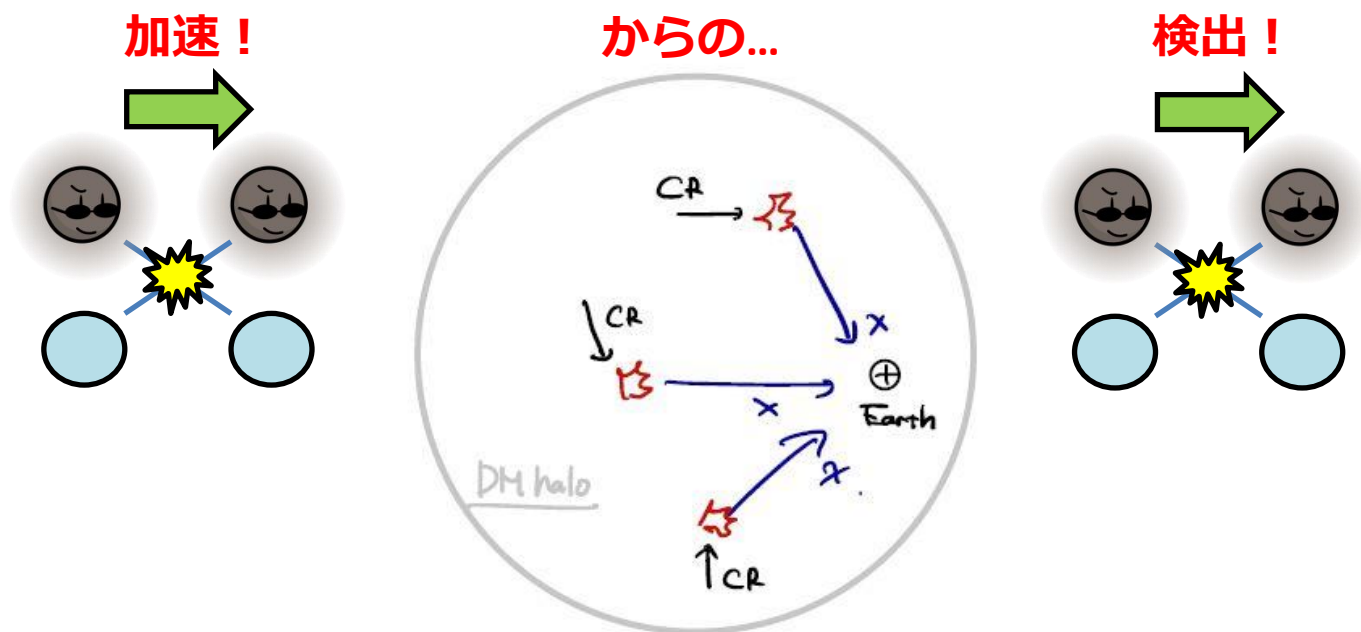
Monojet : one-jet + MET can be obtained from, e.g. $q\bar{q} \rightarrow g\phi(\rightarrow \chi\chi)$

BBN bound : $m_{\chi} > 1 - 10$ MeV (depending on the detail of DM coupling)

Mediator can mix with neutral mesons η or η' depending on the choice of $a\bar{q}q$ coupling.

まとめ

- 軽い暗黒物質はrecoil energyが小さい → 直接探索には”工夫”が必要
- 宇宙線との散乱で、暗黒物質は加速されうる
- 加速された暗黒物質を探索に使うのは有効な手の一つ

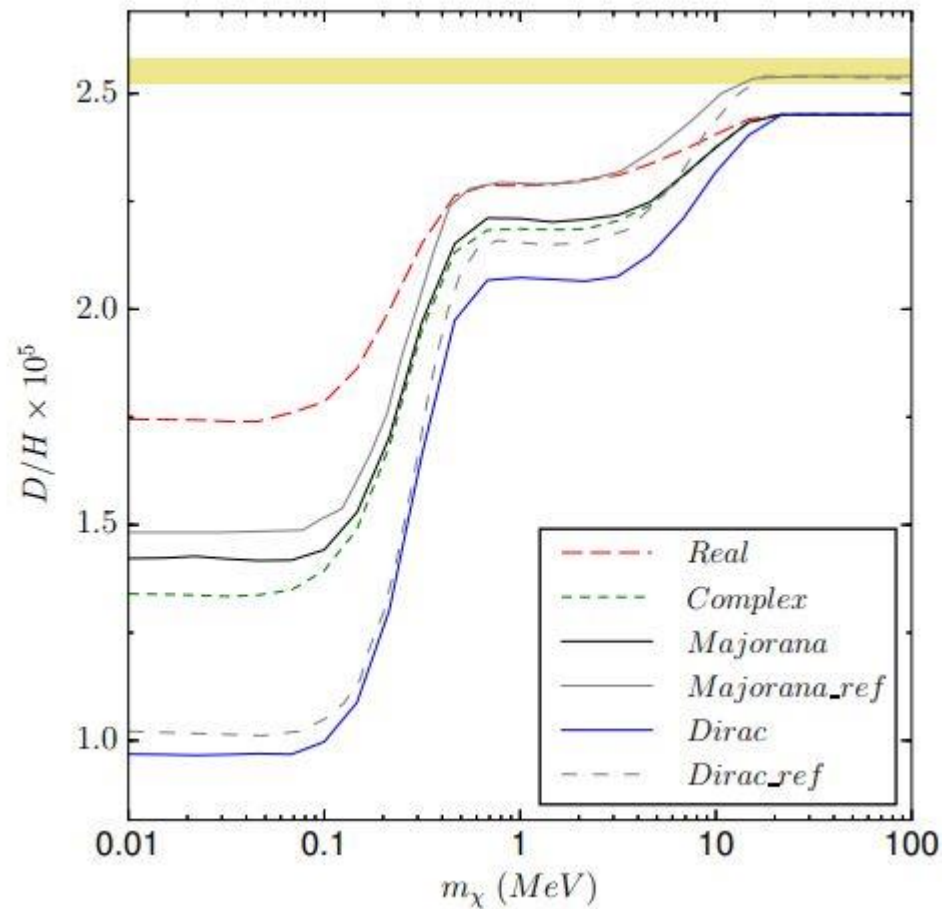


[from Y. Ema in GGI workshop 2019]

Backup slides

BBN constraints

熱浴に入っている余計な自由度があると、BBNの予言がずれる。



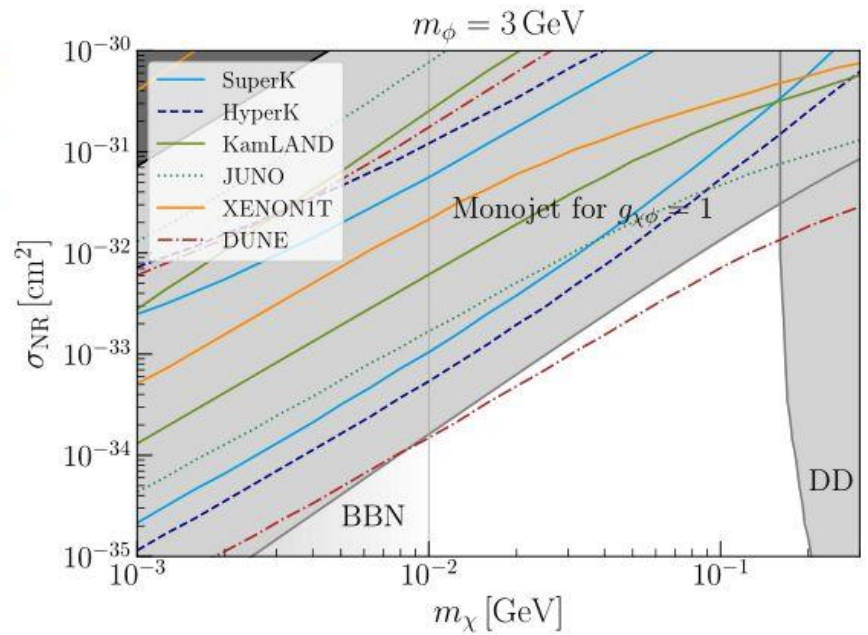
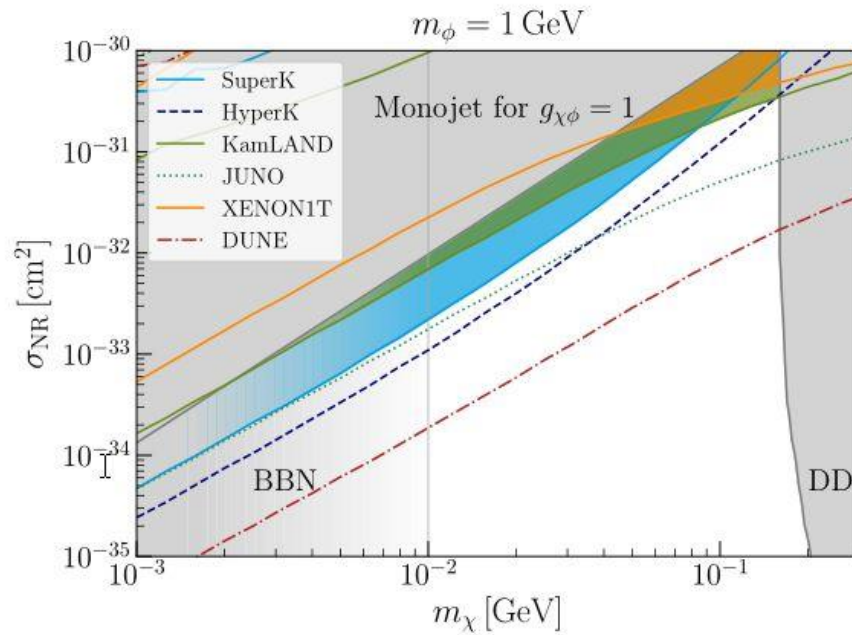
[E. S. Jenssen, phd thesis (2016)]

BBN constraints

Probe	BSM Particle	$e : \nu$ Annihilation Ratio												
		1:10 ⁶	1:10 ⁵	1:10 ⁴	1:10 ³	1:10 ²	1:10 ¹	1:1	10 ¹ :1	10 ² :1	10 ³ :1	10 ⁴ :1	10 ⁵ :1	10 ⁶ :1
BBN	Majorana	2.2	2.0	1.8	1.8	2.0	2.3	2.4	2.2	1.9	1.6	1.1	0.7	0.5
	Dirac	3.3	2.6	2.2	2.2	2.3	2.4	2.6	2.4	2.1	1.9	1.6	1.1	0.8
	Scalar	1.2	1.2	1.3	1.5	1.7	2.0	2.2	2.0	1.6	1.2	0.8	0.4	0.4
	Complex Scalar	2.2	2.0	1.8	1.8	2.0	2.2	2.4	2.2	1.9	1.6	1.1	0.7	0.5
	Vector	2.9	2.3	2.0	2.0	2.2	2.4	2.5	2.3	2.1	1.8	1.4	0.9	0.7
BBN+ $\Omega_b h^2$	Majorana	2.6	2.2	1.8	1.9	2.1	2.4	2.6	2.3	1.9	1.5	1.1	0.9	3.3
	Dirac	4.8	3.0	2.3	2.2	2.4	2.6	2.8	2.5	2.2	1.9	1.5	1.7	6.2
	Scalar	1.3	1.3	1.3	1.5	1.8	2.1	2.3	2.1	1.7	1.2	0.7	0.5	0.6
	Complex Scalar	2.8	2.2	1.8	1.9	2.1	2.4	2.6	2.3	1.9	1.6	1.1	1.0	3.5
	Vector	4.0	2.7	2.1	2.1	2.3	2.5	2.7	2.4	2.1	1.7	1.3	1.5	5.2
Planck	Majorana	8.2	7.6	4.6	3.4	3.6	4.1	4.5	3.8	3.0	2.1	1.1	0.3	4.1
	Dirac	11.0	10.1	6.1	4.0	4.0	4.4	4.8	4.2	3.4	2.4	1.3	0.4; 1.2 - 4.1	7.0
	Scalar	5.4	5.1	3.3	2.8	3.1	3.7	4.1	3.5	2.7	1.8	0.8	-	-
	Complex Scalar	8.3	7.6	4.6	3.4	3.6	4.1	4.5	3.8	3.0	2.1	1.1	0.2	4.3
	Vector	9.8	8.9	5.3	3.7	3.8	4.3	4.7	4.1	3.2	2.3	1.2	0.3; 1.2 - 3.4	6.0
Planck+ H_0	Majorana	4.7	3.3	2.0	2.0	2.3	2.7	3.0	3.2	2.5	1.8	0.9	0.2; 0.4 - 8.4	8.9
	Dirac	7.6	5.4	2.6	2.4	2.6	3.0	3.2	3.5	2.8	2.1	1.1; 3.5 - 5.9	0.4; 0.6 - 10.5	11.4
	Scalar	1.6	1.4	1.4	1.6	2.0	2.4	2.7	2.9	2.2	1.5	0.7	0.3 - 5.8	6.2
	Complex Scalar	4.9	3.5	2.0	2.0	2.3	2.7	3.0	3.2	2.5	1.8	0.9	0.2; 0.4 - 8.3	8.9
	Vector	6.6	4.6	2.4	2.2	2.5	2.8	3.1	3.4	2.7	1.9	1.1; 3.4 - 5.4	0.3; 0.5 - 9.7	10.3
BBN+Planck	Majorana	6.4	5.4	3.1	2.7	2.9	3.4	3.7	3.2	2.6	1.9	1.1	7.0	7.8
	Dirac	9.2	7.7	3.9	3.1	3.3	3.6	3.9	3.5	2.9	2.2	1.4	9.3	10.4
	Scalar	3.6	3.2	2.2	2.2	2.6	3.0	3.4	2.9	2.3	1.6	0.8	4.5	5.0
	Complex Scalar	6.5	5.5	3.1	2.7	2.9	3.3	3.7	3.2	2.6	1.8	1.1	7.1	7.8
	Vector	8.2	6.9	3.5	2.9	3.1	3.5	3.8	3.4	2.7	2.0	1.3	8.5	9.4

[Sabti et al, 1910.01649]

Scalar mediator



Earth attenuation

- Depth of detector: $\mathcal{O}(\text{m}) \sim \mathcal{O}(\text{km})$, the Earth radius: $\mathcal{O}(10^4 \text{ km})$.

$$\Rightarrow n_i \sigma z \sim 1 \Rightarrow \sigma \sim \mathcal{O}(10^{-26} - 10^{-33} \text{ cm}^2),$$

where z : depth from surface, and $n_p \sim n_e \sim 10^{24} \text{ cm}^3$: density in the Earth.

- We make three simplifying assumptions:

1. energy loss approximated by averaged one (constraint weaker).
2. deflection ignored (constraint stronger).
3. particle number density in the Earth being constant.



The kinetic energy at depth z is described by

$$\frac{dK_\chi(z)}{dz} = -n_i \int dK K \frac{d\sigma}{dK} (K_\chi(z), K),$$

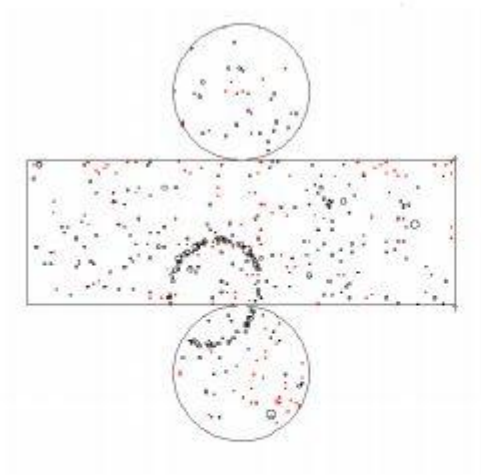
with $K_\chi(z=0) = K_\chi$: kinetic energy at the Earth's surface.

- (1) tends to win against (2) $\rightarrow$ conservative bound. [Emken, Kouvaris 1802.04764]

[slide by Y. Ema in GGI workshop 2019]

Particle ID at Super-K

proton



muon

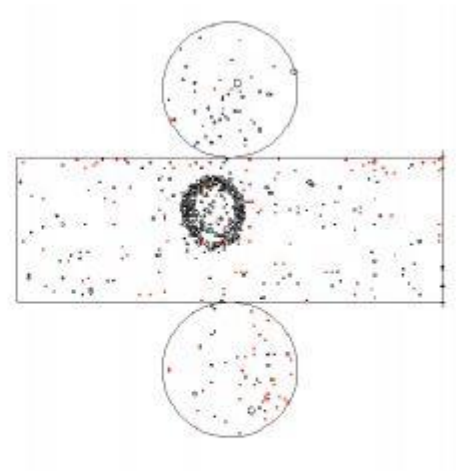
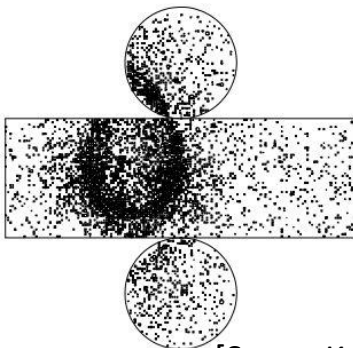


FIG. 1: Event displays of a Monte-Carlo NC elastic event, with proton momentum of 1490 MeV/c (left), and a Monte-Carlo 300 MeV/c muon. The proton stopped early, causing a thin ring pattern on the wall. The muon ring is thicker than most proton rings with similar opening angles.

[Super-K, 0901.1645]

electron



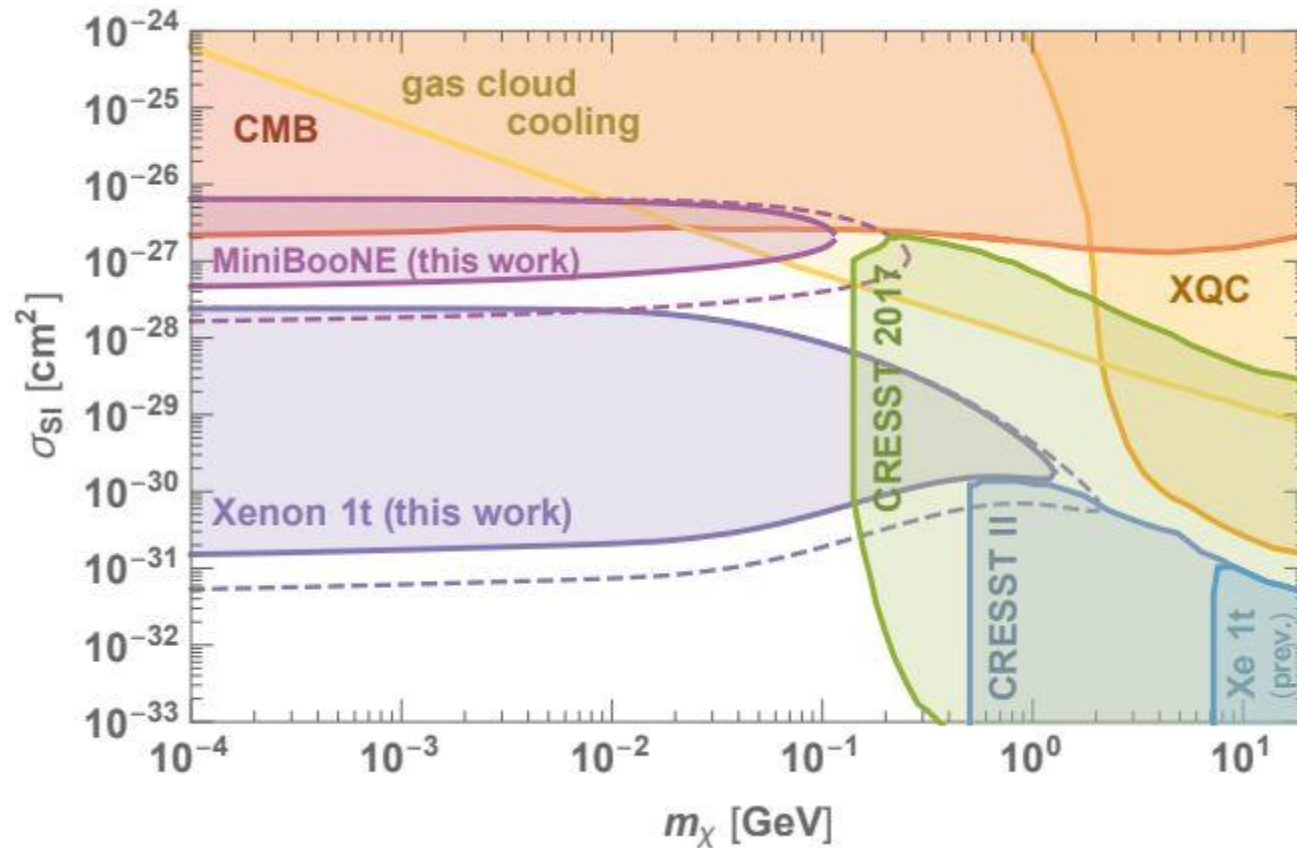
Electron : blurred edge

Muon : sharp edge

Proton : sharp edge, thin

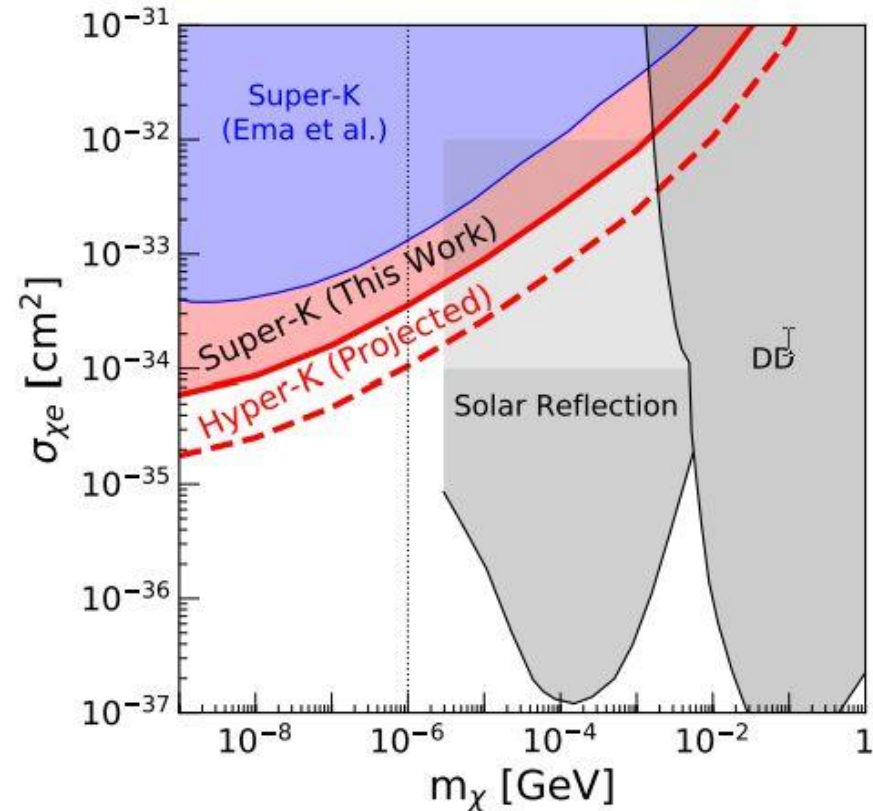
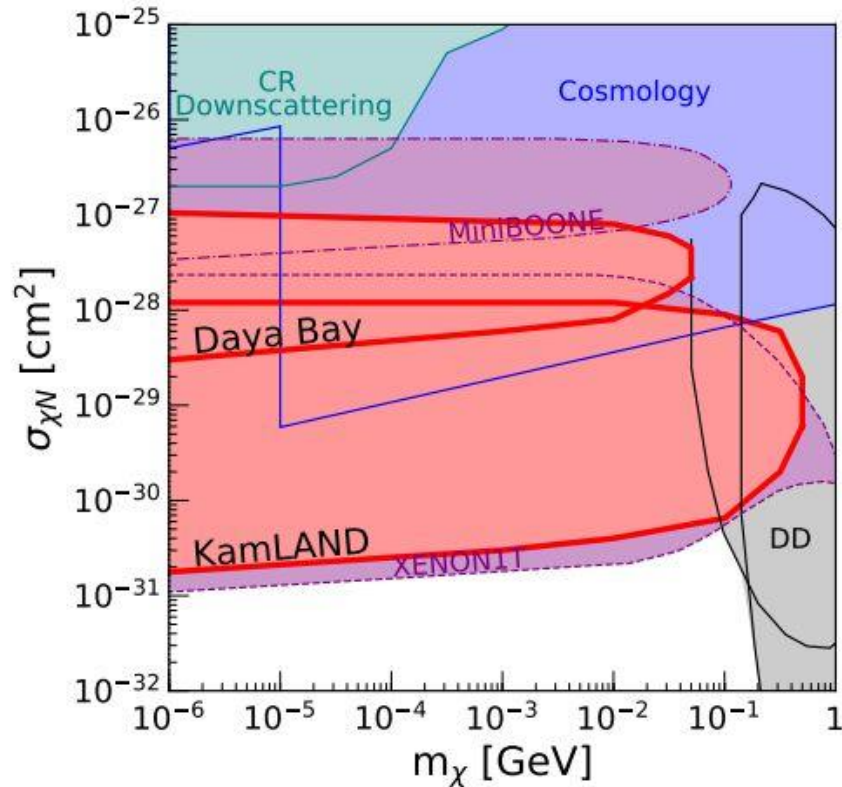
[Super-K, hep-ex/0501064]

Bringmann & Pospelov, 1810.10543



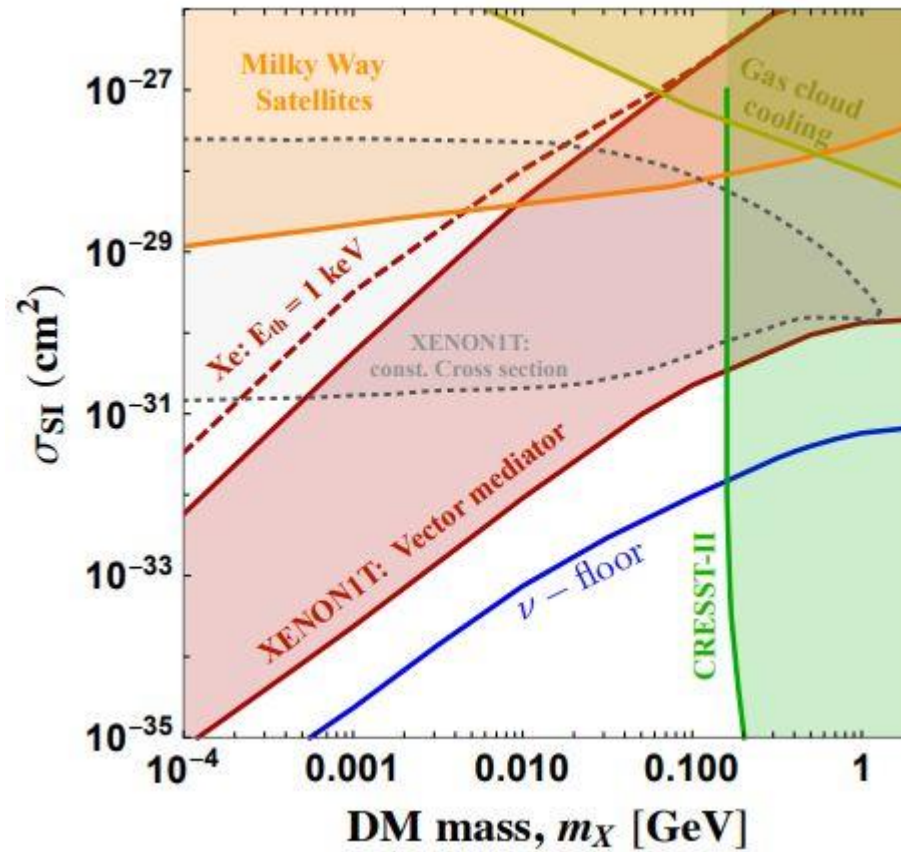
Constant cross section

Cappiello & Beacom, 1906.11283

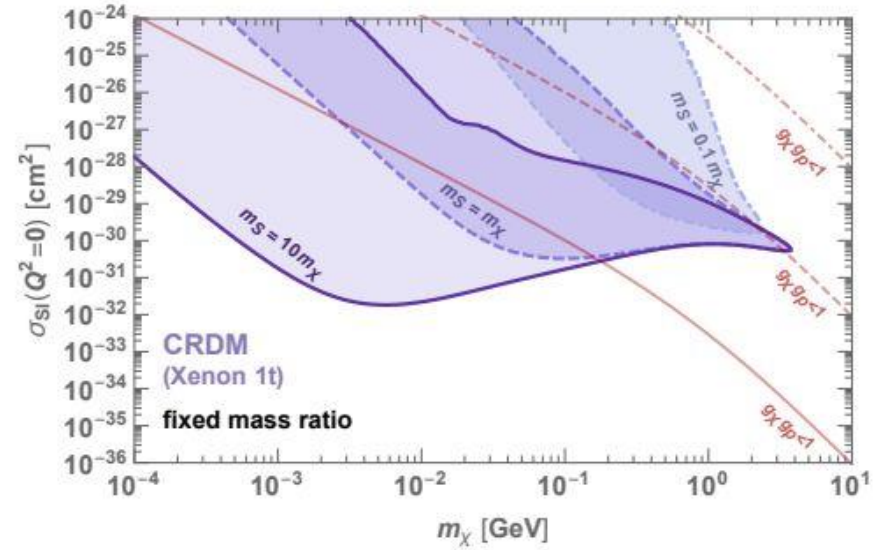
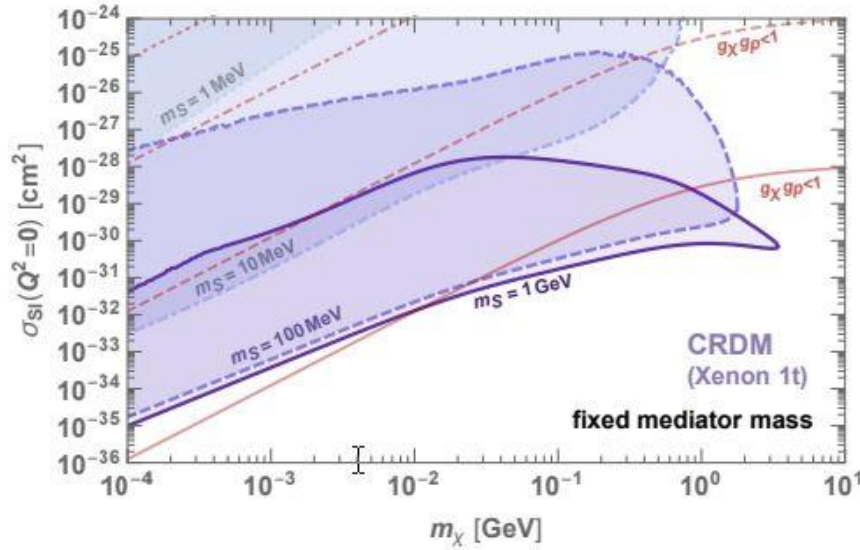


Constant cross section

Dent et. al., 1907.03782



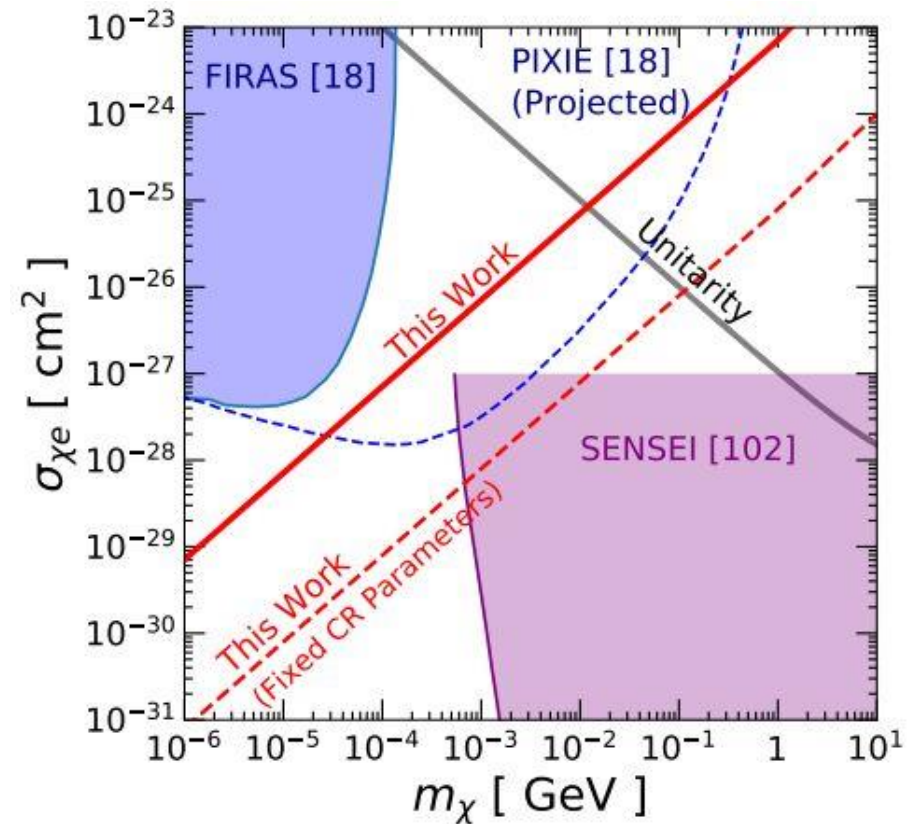
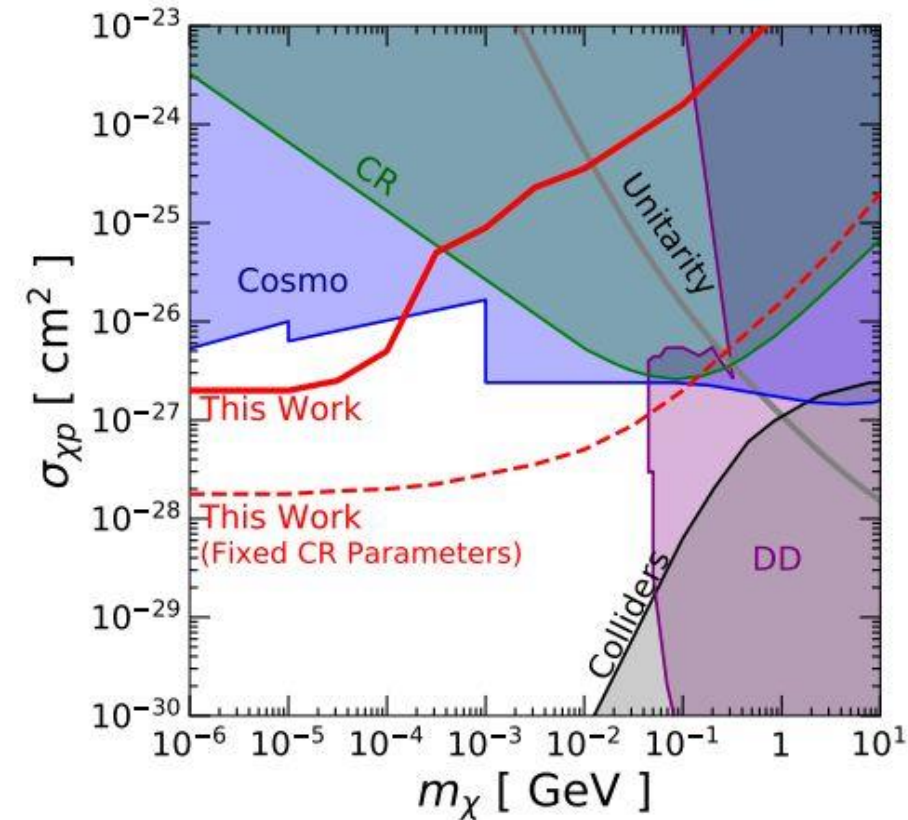
Bondarenko et. al., 1909.08632



$$\mathcal{L}_{S/\chi} = \frac{1}{2} \partial_\mu S \partial^\mu S + \bar{\chi} (i \not{\partial} - m_\chi) \chi - g_\chi S \bar{\chi} \chi - V(S, H).$$

$$V(S, H) = (A_{hs} S + \lambda_{hs} S^2) H^\dagger H + \mu_h^2 H^\dagger H + \lambda_h (H^\dagger H)^2 + V(S).$$

Cappiello, Ng, Beacom, 1810.07705



Earth attenuation

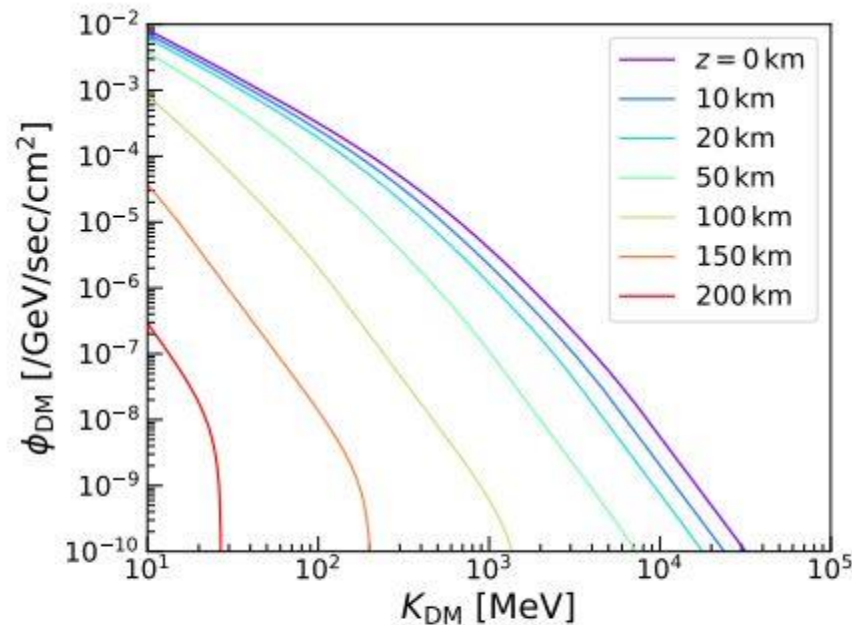
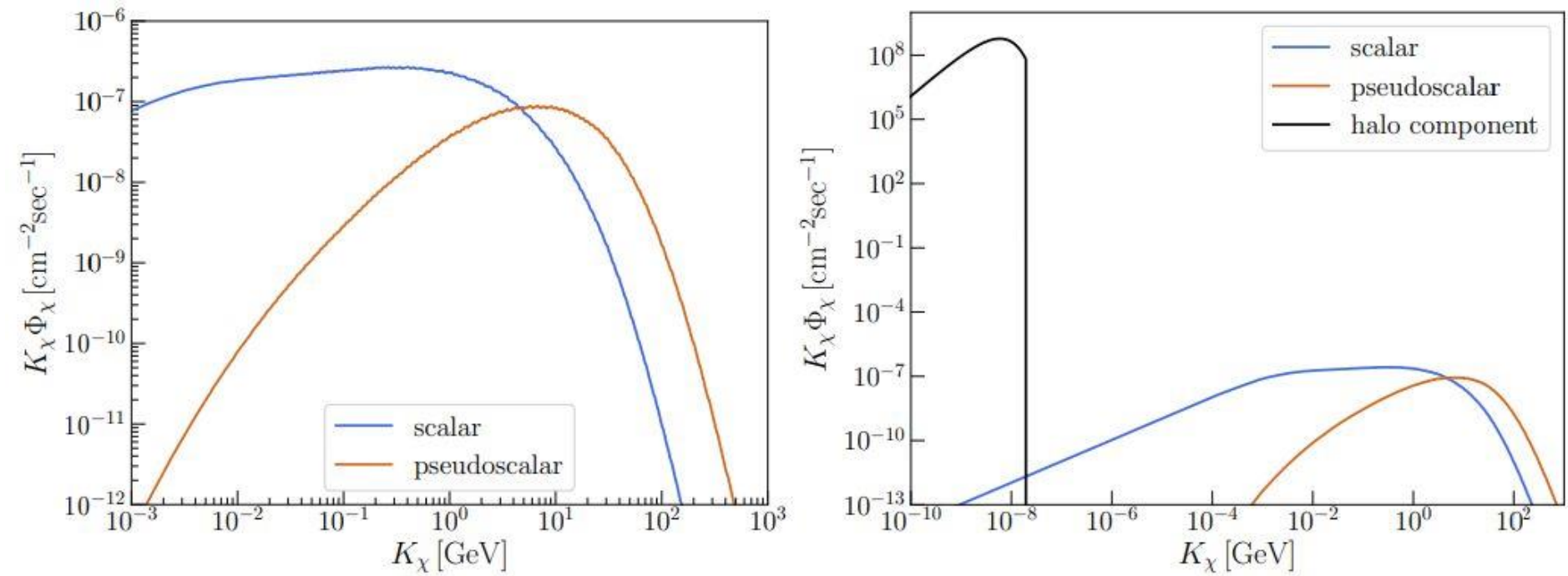
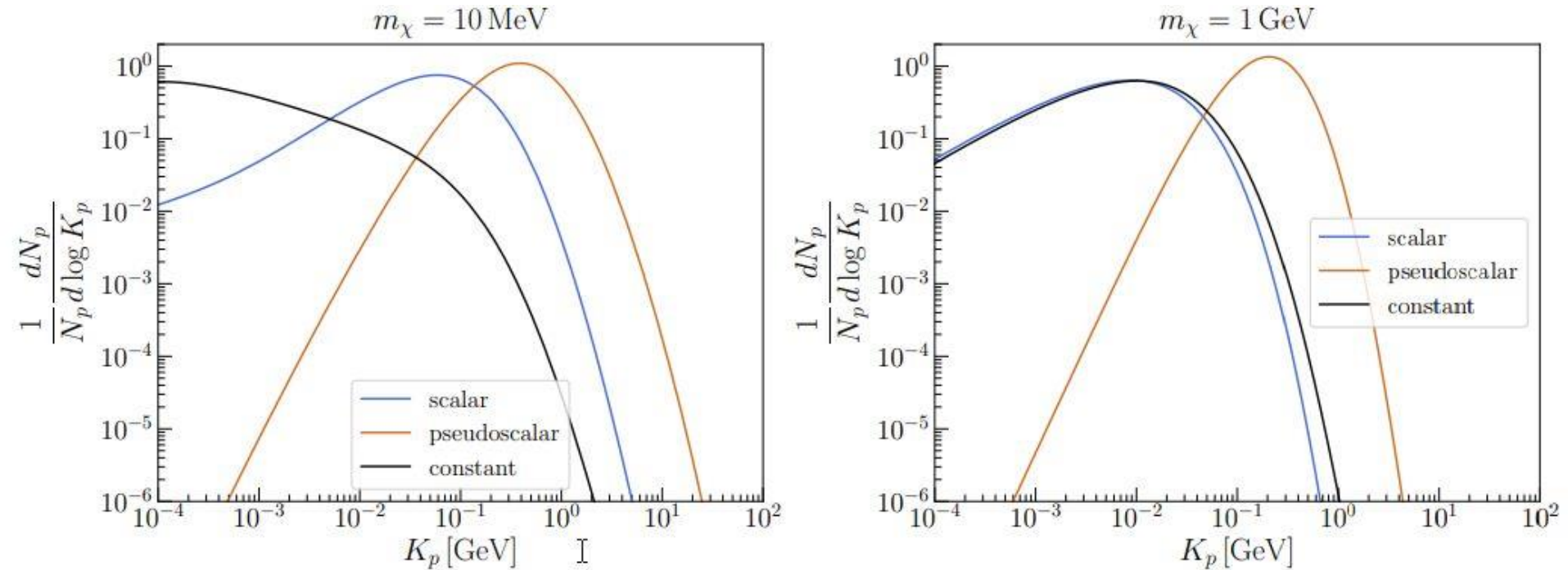


FIG. 5: The effects of the Earth attenuation on the dark matter flux for $M_{\text{DM}} = 0.1$ MeV. The depth z measures the distance from the Earth's surface. The other parameters are taken as $\sigma_e = 10^{-30}$ cm², $R = 10$ kpc and $h = 1$ kpc.

DM flux at earth



Recoil energy w/o earth attenuation



Earth attenuation effect

