



WIMP暗黒物質

Satoshi Shirai (Kavli IPMU)

暗黒物質に必要なこと

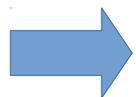
- とても安定
- 相互作用は十分に弱い
- 初期宇宙で適切な生成メカニズム
- 冷たい

粒子の寿命

$$\text{崩壊率} \sim \sum_{\text{channel}} (\text{coupling})^2 (\text{mass dimension})$$

典型的には

$$\text{寿命} = 1/\text{崩壊率} \sim 10^{-24} \text{sec} @ 1 \text{ GeV}$$



普通はとても短命なように思える

長生きするために

長生き粒子は何か特殊なことを意味している

$$\sim \sum_{\text{channel}} (\text{coupling})^2 (\text{mass dimension})$$

限られたチャンネル: 何らかの対称性

弱い結合: 近似的な対称性や高エネルギーの物理起源

小さな質量次元: 軽い

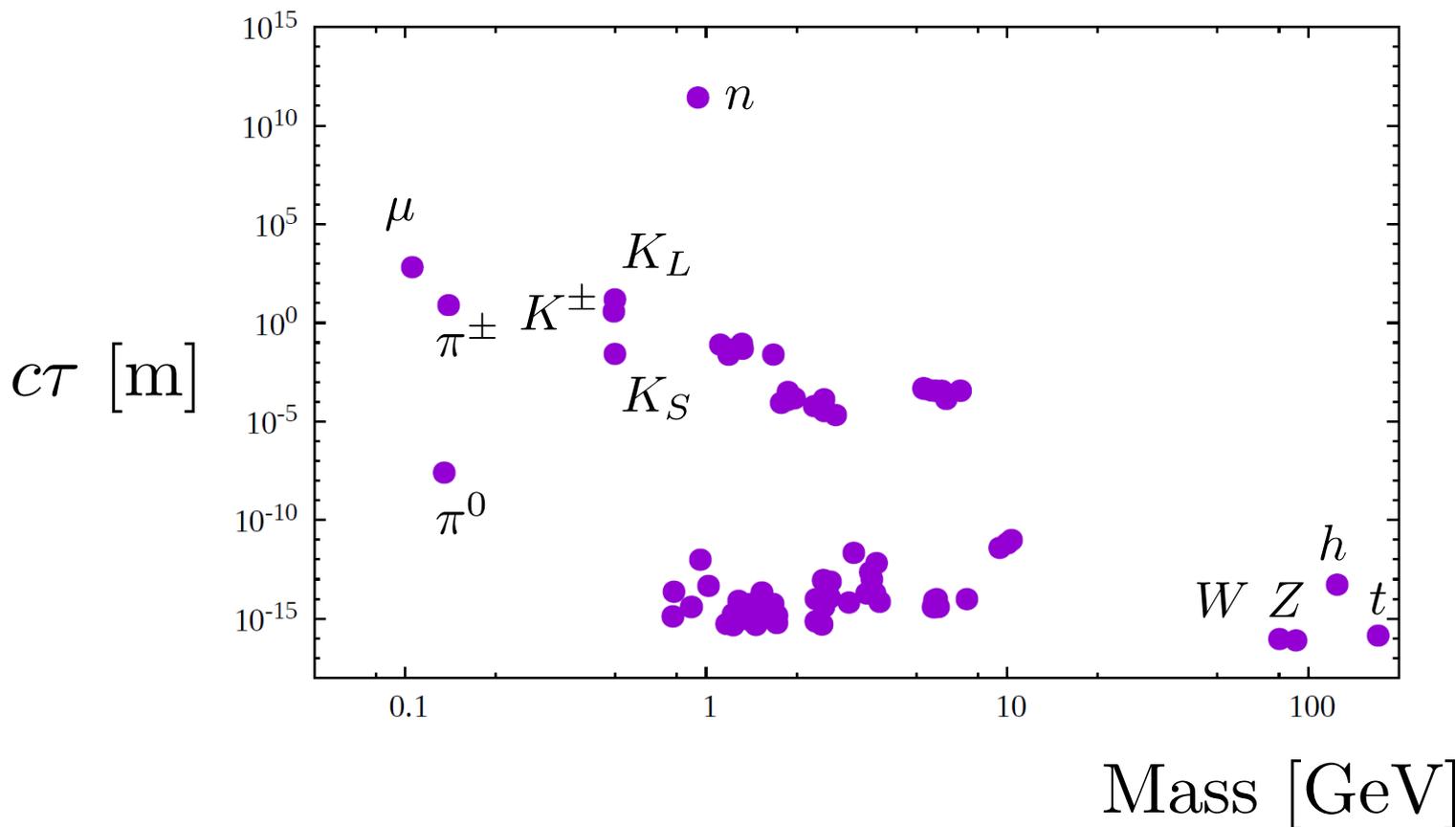
Axion Dark Matter

標準模型の場合

ν

e

p



安定粒子

何らかの対称性をもっている \longleftrightarrow 保存則

- 陽子
 - バリオン数を持つ中で最も軽い
- 電子
 - QED電荷を持つ中で最も軽い
- ニュートリノ
 - フェルミオン数、レプトン数を持つ中で最も軽い

暗黒物質の場合

何らかの対称性を課す



安定な粒子

暗黒物質の場合

何らかの対称性を課す



安定な粒子

 **Kavli IPMU**
@KavliIPMU フォローする

大栗博司機構長らは、重力と量子力学を統一する理論では対称性がすべて破れてしまうことを、ホログラフィー原理を用いて証明しました。

 **量子重力には対称性はない — 大栗機構長らが証明**
2019年6月19日 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU)
ipmu.jp

22:08 - 2019年6月18日

568件のリツイート 914件のいいね 

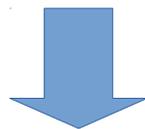
  568  914

重力と対称性

ブラックホールは
質量, スピン and 電荷 のみで特徴づけられる

その他のグローバルチャージは存在しない,
e.g., baryon number.

量子力学で経路積分を考えると、ブラックホールの配位も含まれる



グローバルチャージの情報損失

重力と対称性: 帰結1?

- 破れの大きさは不明.
- Naive guess: Planck suppressed operators.
- 陽子はGUTがなくても崩壊する.

$$\tau_p \sim \frac{M_{Pl}^4}{m_{\text{proton}}^5} \sim 10^{42} \text{ year?}$$

$$\frac{1}{M_{Pl}^2} QQQ L$$

current limit 10^{34} y

$$M_{Pl} = 2 \times 10^{18} \text{ GeV}$$

重力と対称性: 帰結2?

- 破れの大きさは不明.
- Naive guess: Planck suppressed operators.
- ニュートリノは Majorana or pseudo-Dirac. $\frac{1}{M_{Pl}} (LH)^2$

$$m_{\nu}^{\text{Majorana}} \gtrsim \frac{v^2}{M_p} \sim O(10^{-5}) \text{ eV?}$$

重力と対称性: 帰結3?

- 破れの大きさは不明.
- Naive guess: Planck suppressed operators.
- 暗黒物質は不安定?

$$\tau_{\text{DM}} \sim \frac{M_{pl}^2}{m_{\text{DM}}^3} \sim 1 \text{ month?}$$

Axion模型での困難

Strong CP problem

$$\theta \tilde{G}G$$

CP violation parameter が 10^{-9} より小さい

Peccei-Quinn (PQ) mechanism: Axion solves everything

Requirement: 非常に厳密なGlobal Symmetry (PQ対称性)

PQ breaking terms $\lambda \frac{\phi^5}{M_{Pl}}$  $\lambda \lesssim 10^{-50}$

対称性と素粒子模型

暗黒物質やaxionなどの新物理にはglobal symmetryはとても重要



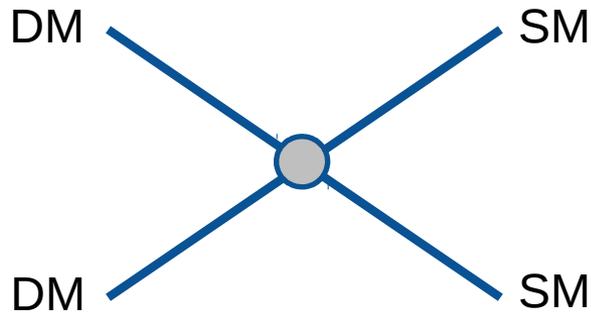
量子重力からの制限のもと、いかにクオリティの高い対称性を実現するか

暗黒物質の条件

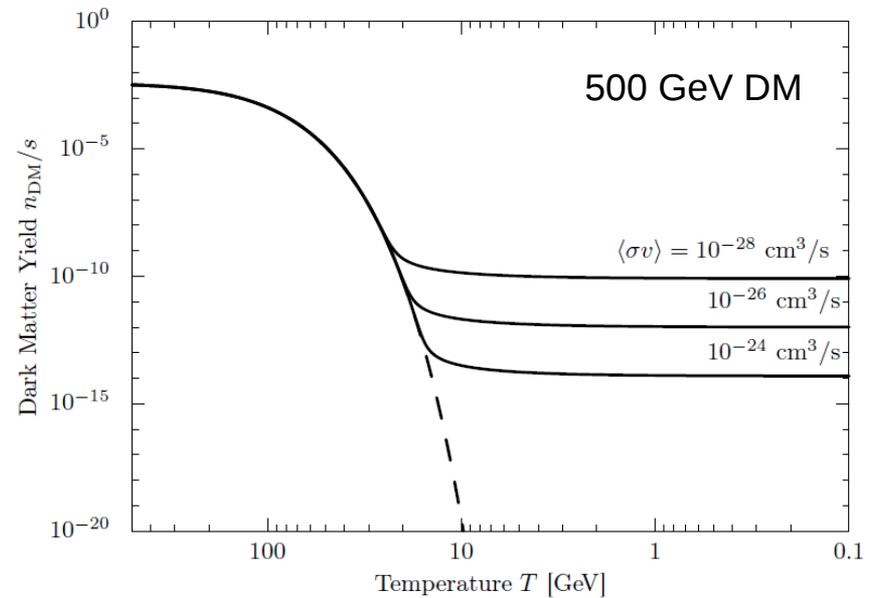
- とても安定
- 相互作用は十分に弱い
- 初期宇宙で適切な生成メカニズム
- 冷たい

WIMP Dark Matter

Weakly Interacting Massive Particle

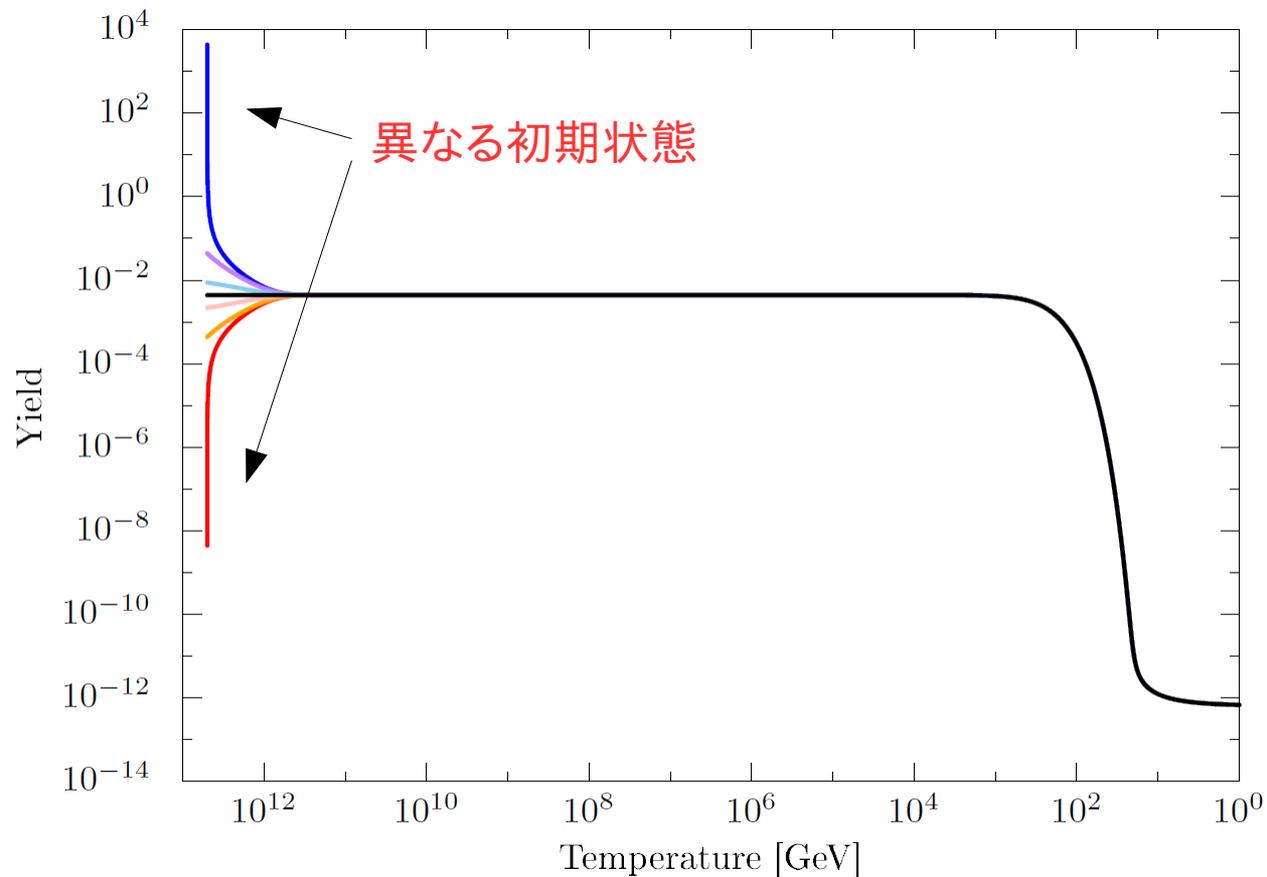


DM abundance



Time

WIMP Dark Matter



WIMP Miracle

熱的残存量(thermal relic density)の近似式

$$\Omega h^2 \simeq 0.1 \left(\frac{\langle \sigma v \rangle}{10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}} \right)^{-1}$$

$$10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s} \simeq 10^{-9} \text{ GeV}^{-2} \sim \frac{g_2^4}{4\pi} \frac{1}{m_{\text{DM}}^2}$$

$m_{\text{DM}} = O(1) \text{ TeV}$ だとちょうどよい量

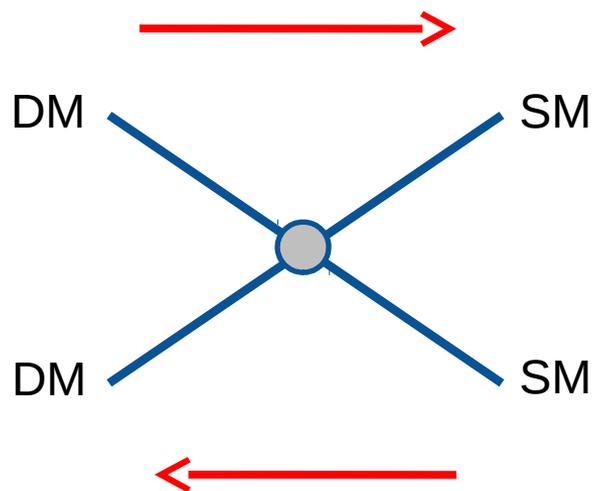
WIMPの良い所

- 様々な新物理模型(BSM)に勝手に入っている。
- 色々なテストの仕方がある。
- 存在量が宇宙の初期状態に依存しない (例外はある)
- 加速器実験などでDMの強いテストができる。(存在量の再構成など)

WIMPの検出

CTA (Cherenkov Telescope Array)

対消滅 (宇宙線、CMB、BBNなどによる間接検出)



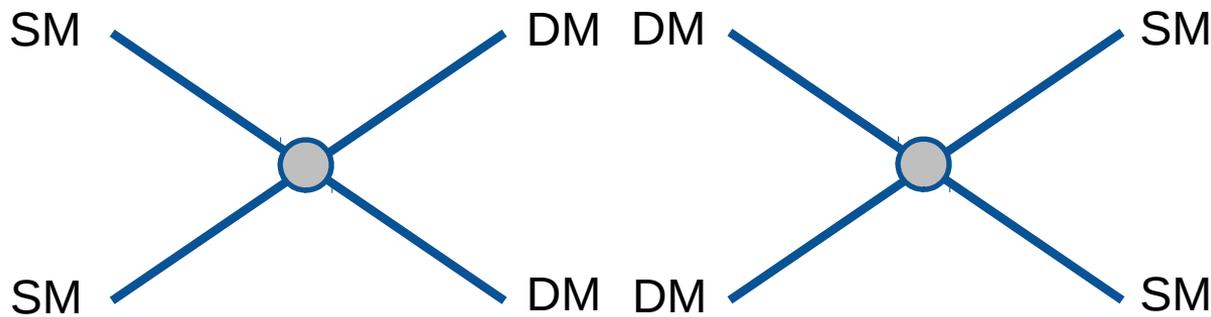
散乱
(直接検出)

PANDAX, XENONnT

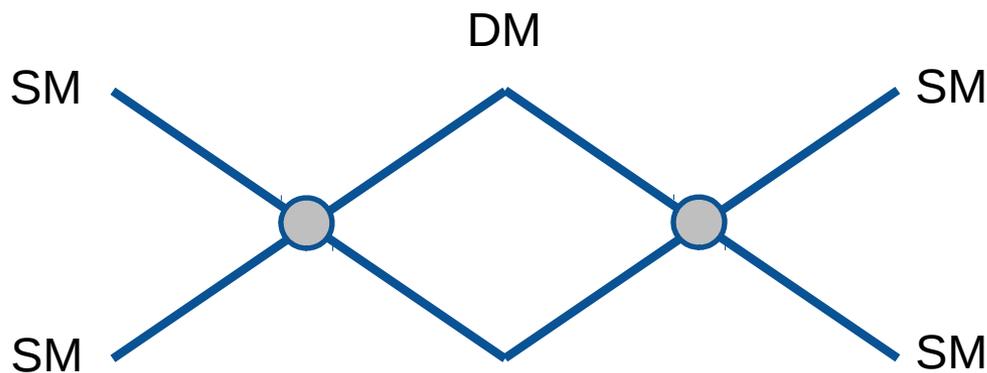
生成
(加速器実験)

LHC, ILC

さらに間接的検出



さらに間接的検出



(Virtual) DMの効果



精密測定

電弱精密測定, フレーバ, CP...

色々な模型の色々なWIMP

- Bino
- Wino
- Higgsino
- KK photon
- T-odd Photon
- Technibaryon
- Minimal 5plet fermion
- Minimal singlet scalar
- Minimal 7plet scalar
- ...

Minimal WIMP Model

WIMP: Weakly **I**nteracting **M**assive **P**article

Minimal WIMP Model

WIMP: Weakly Interacting Massive Particle

SMゲージ相互作用

EWIMP: ElectroWeakly Interacting Massive Particle

Minimal Dark Matter (MDM)

Minimal Dark Matterの特徴

Fermionの場合

- 強い予言性
- Collider, direct detection, indirect detectionどれも重要
- 非摂動効果や束縛状態の効果が重要で理論的にも面白い

Scalarの場合はHiggs粒子と未知の結合を含む

$$\lambda\phi\phi H^\dagger H$$

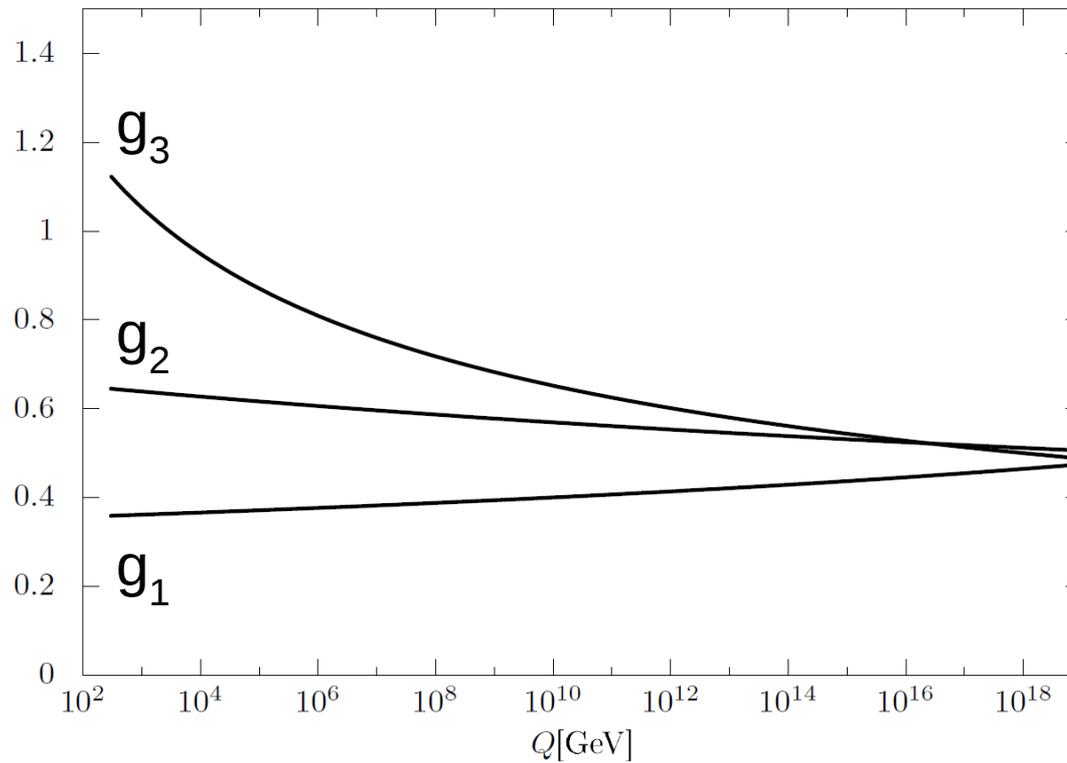
この結合は一般には直接検出などで制限される

Gauge interacting DM

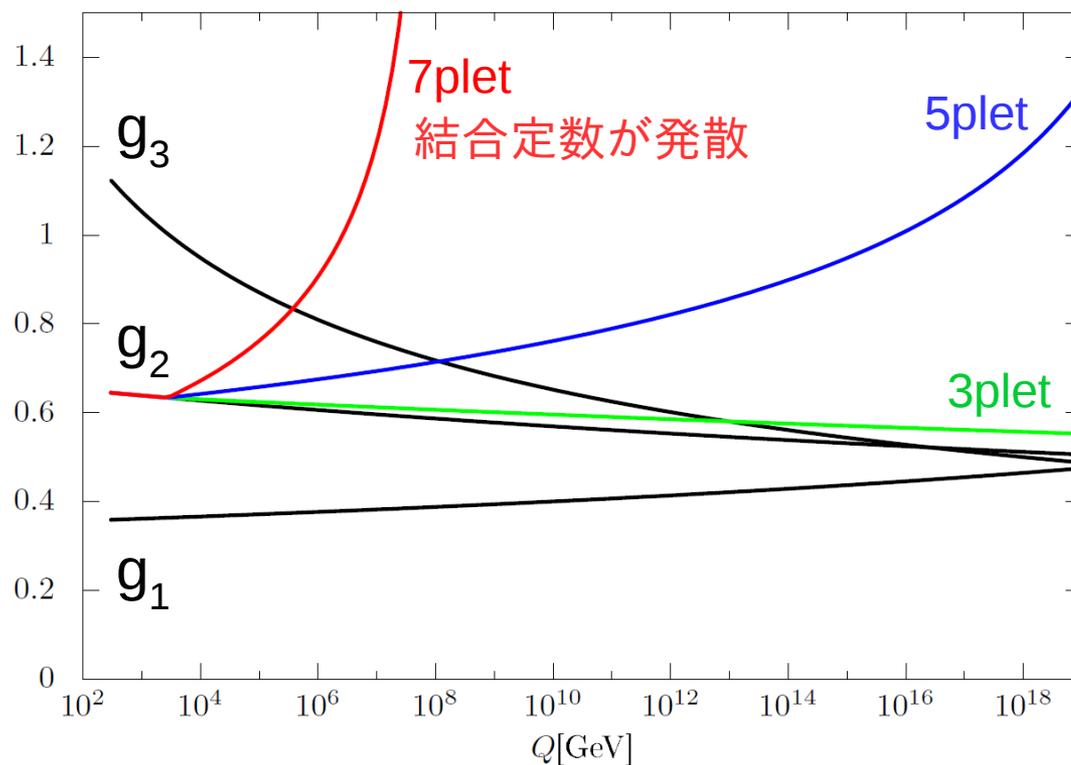
DM's nature depends on $SU(2) \times U(1)$ charge

		SU(2)				
		1	2	3	4	5
U(1)	n	Y				
	0		C	wino	C	5plet
	1/2	C	higgsino	C		C
	1	C	C		C	
	3/2	C	C	C		C
	2	C	C	C	C	
	...	C	C	C	C	C

MDMとゲージ結合



MDMとゲージ結合



Gauge interacting DM

DM's nature depends on $SU(2) \times U(1)$ charge

blow-up

		SU(2)				
U(1)		1	2	3	4	5
Y	n					
0			C	wino	C	5plet
1/2		C	higgsino	C		C
1		C	C		C	
3/2		C	C	C		C
2		C	C	C	C	
...		C	C	C	C	C

Disfavored via precision measurement and direct detection

Wino Property

- Majorana fermion
- Hypercharge $Y=0$

- $SU(2)_L$ triplet $\begin{pmatrix} \widetilde{W}^+ \\ \widetilde{W}^0 \\ \widetilde{W}^- \end{pmatrix}$

- Mass < 3 TeV

[Hisano, Matsumoto, Nagai, Saito & Senami, 06]

Why Wino.

Randall & Sundrum '98

Giudice, Luty, Murayama & Rattazzi '98

- SUSY modelに入っている
 - **R-parity**はクオリティの高い対称性
 - anomaly mediation modelの自然な予言
 - SUSY models consistent with flavor/CP, Higgs mass and GUT.
- Most minimal dark matter.
 - 質量だけがfree parameter.
- Direct/indirect DM探査が非常に有効.
 - 10年程度で全領域がカバーできるはず
- Rich signature at LHC.

Higgsino Dark Matter

Higgsino is

- (pseudo)Dirac fermion
- Hypercharge $|Y|=1/2$
- SU(2)doublet $\begin{pmatrix} \tilde{H}_u^+ \\ \tilde{H}_u^0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \tilde{H}_d^0 \\ \tilde{H}_d^- \end{pmatrix}$
- <1 TeV $\Omega h^2 \simeq 0.1 \left(\frac{m_{\tilde{H}}}{1.1 \text{ TeV}} \right)^2$

5plet DM

- Majorana fermion
- Hypercharge $Y=0$

- SU(2) 5plet $\begin{pmatrix} \psi^{++} \\ \psi^+ \\ \psi^0 \\ \psi^- \\ \psi^{--} \end{pmatrix}$

- <10 TeV?

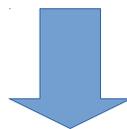
5plet Nature?

Cirelli, Fornengo & Strumia 06

- 対称性なしに勝手に安定になる
 - 高い量子数のおかげで崩壊するのに時間がかかる
 - 対称性がないので有限時間の寿命を持っている可能性がある
- 結合が非常に強いため、非摂動効果が顕著
- 加速器でのシグナルも面白い
 - ただし、10 TeVの粒子を作るのはかなりしんどい

Minimal Dark Matterの検出

Minimal DMの電弱相互作用は十分強い



(高エネルギーでは)作るのも簡単だし、物質との相互作用も大きい

- LHCでの生成断面積は大きい
- 光速の数十パーセントのMDMと物質との相互作用の大きさはニュートリノ相互作用と同程度



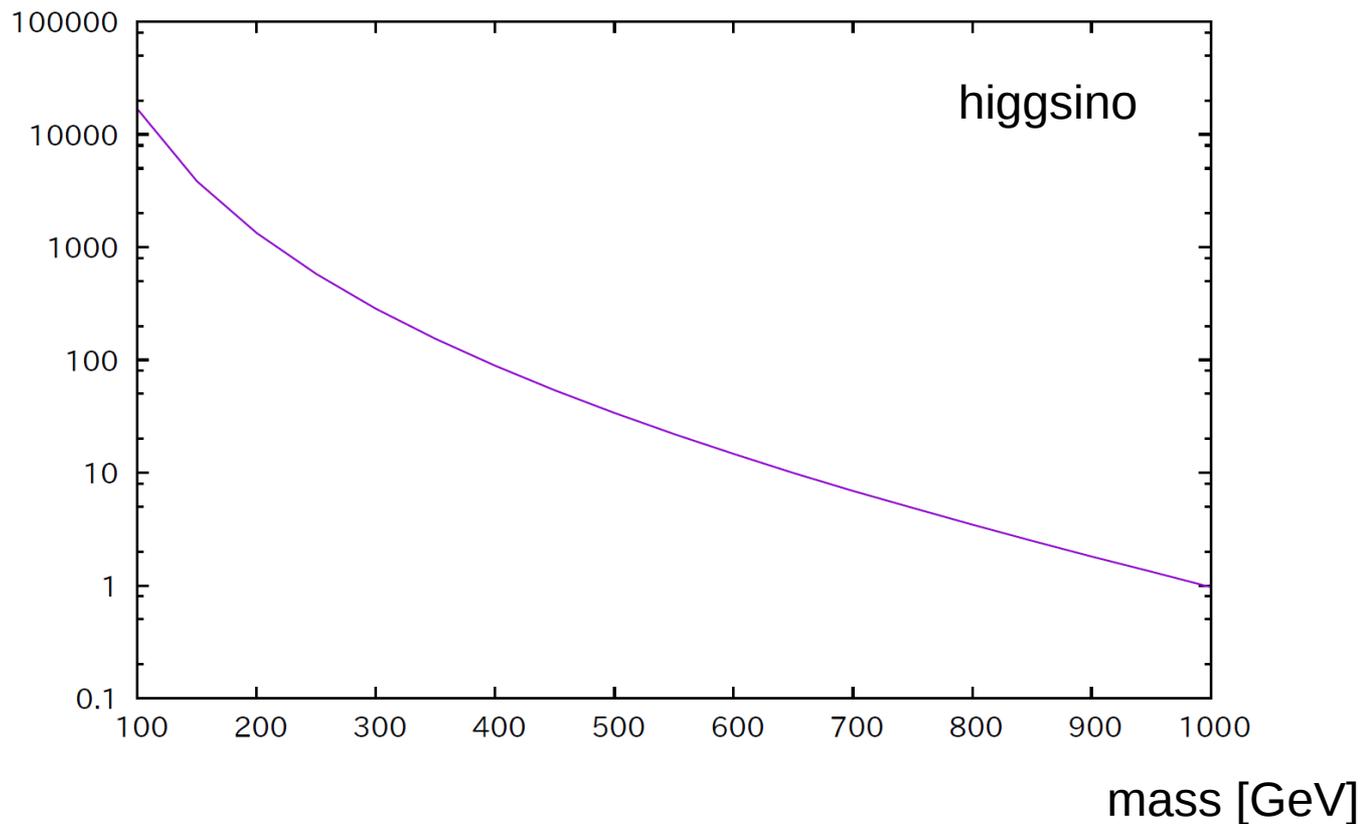
生出さんのトーク



浜口さんのトーク

Cross Section @ LHC

cross section [fb]

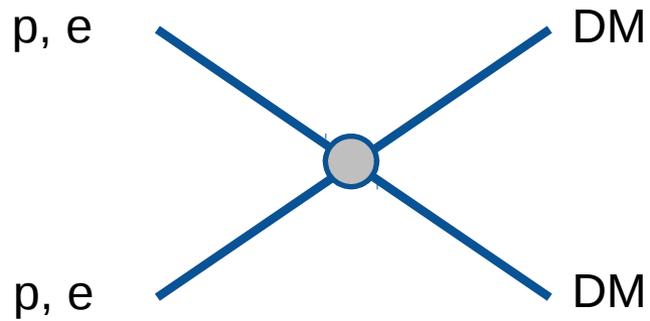


現在のLHCの積算ルミノシティは 100 fb^{-1}



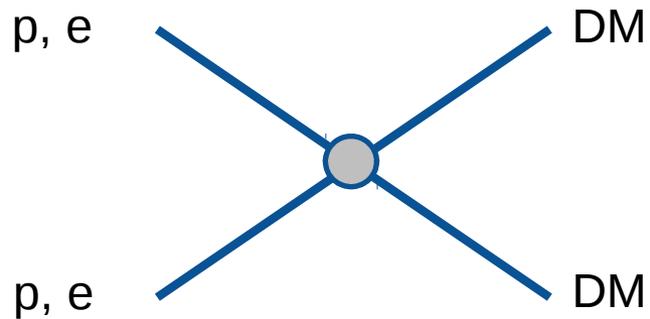
100個以上の1 TeV DMは作られている

Collider Signals of DM



DM is invisible

Collider Signals of DM



DM is invisible

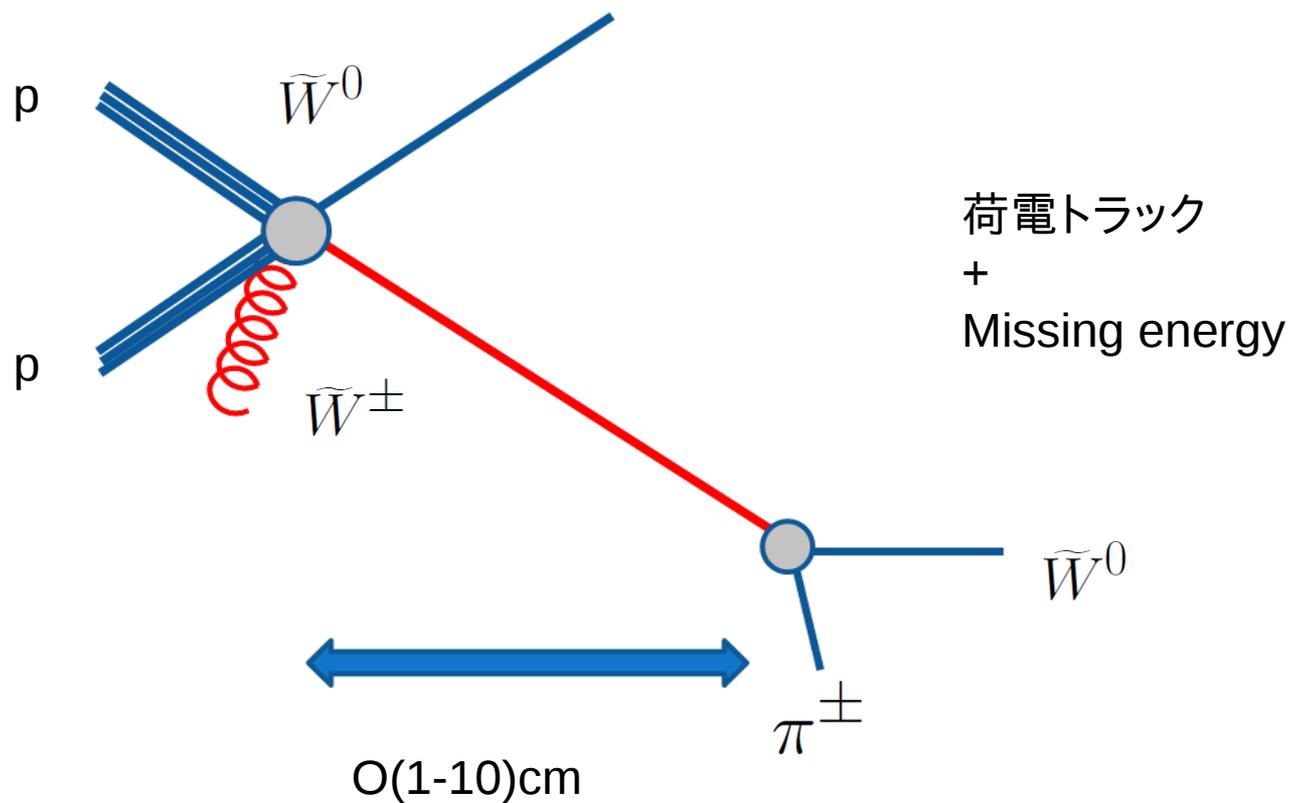
DMのcharged partnerをみる

荷電粒子の崩壊長

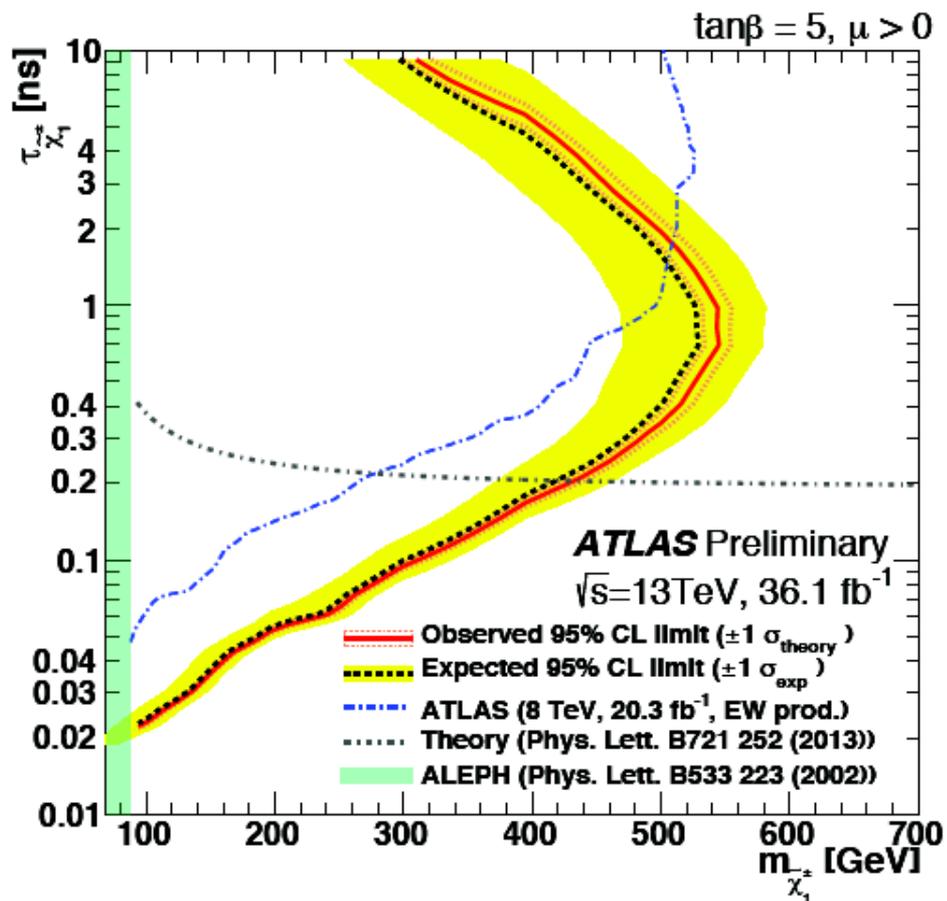
SU(2)

U(1)	Y	n	SU(2)				
			1	2	3	4	5
	0			C	~5 cm	C	~ 2 cm
	1/2	C		~1 cm	C	~ 1mm	C
	1	C	C		~1 mm	C	...
	3/2	C	C			~0.1m m	...
	2	C	C	C		C	...
	...	C	C	C	C	C	...

加速器でのシグナル

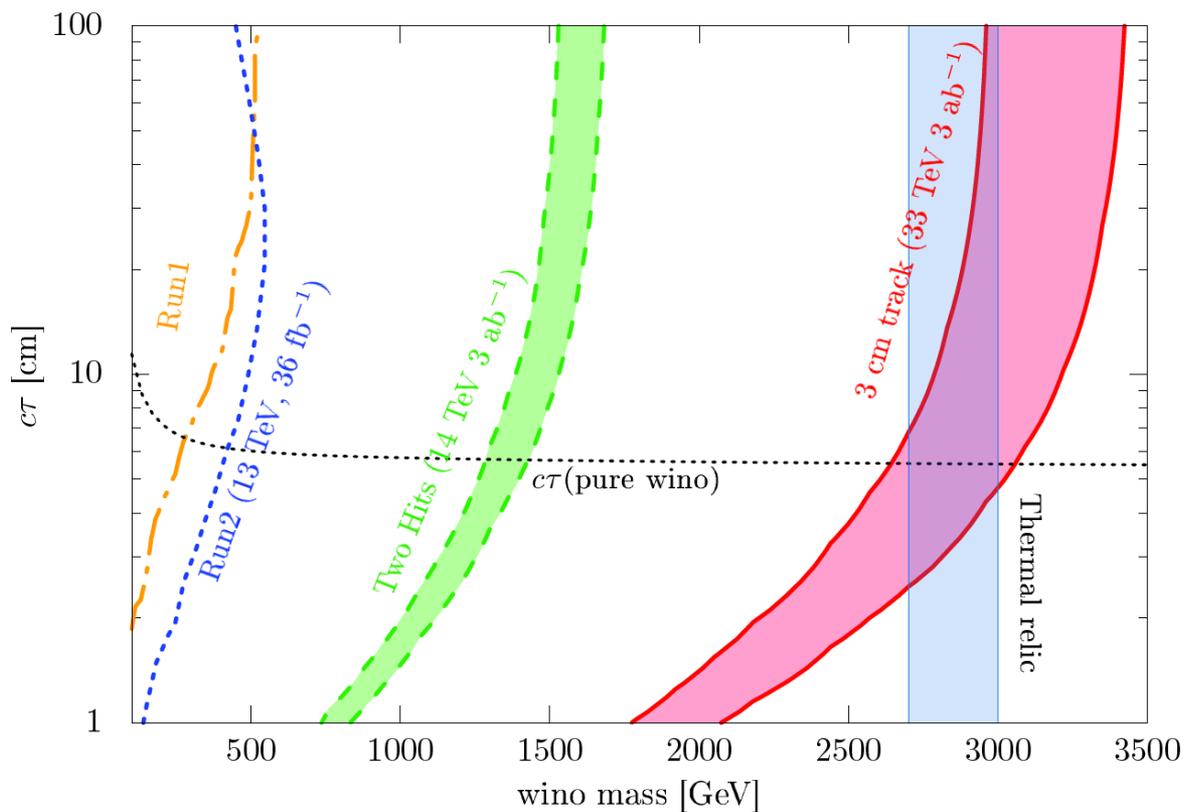


LHCでの制限



Wino 430 GeVまで排除

Winoの楽観的な展望



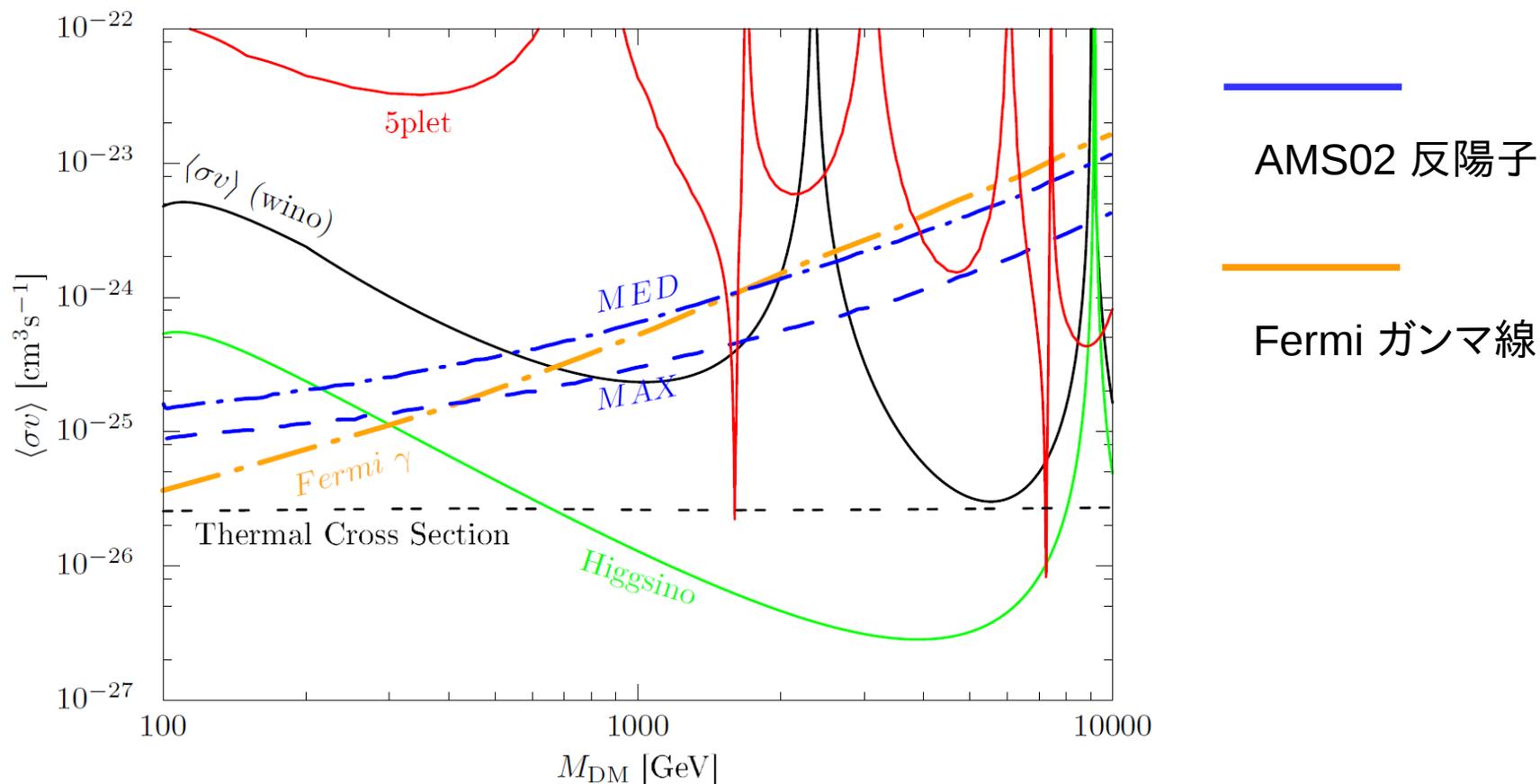
- Trackerの向上
- Energyの向上
- 輝度の向上

3 TeVくらいまでいけるかも



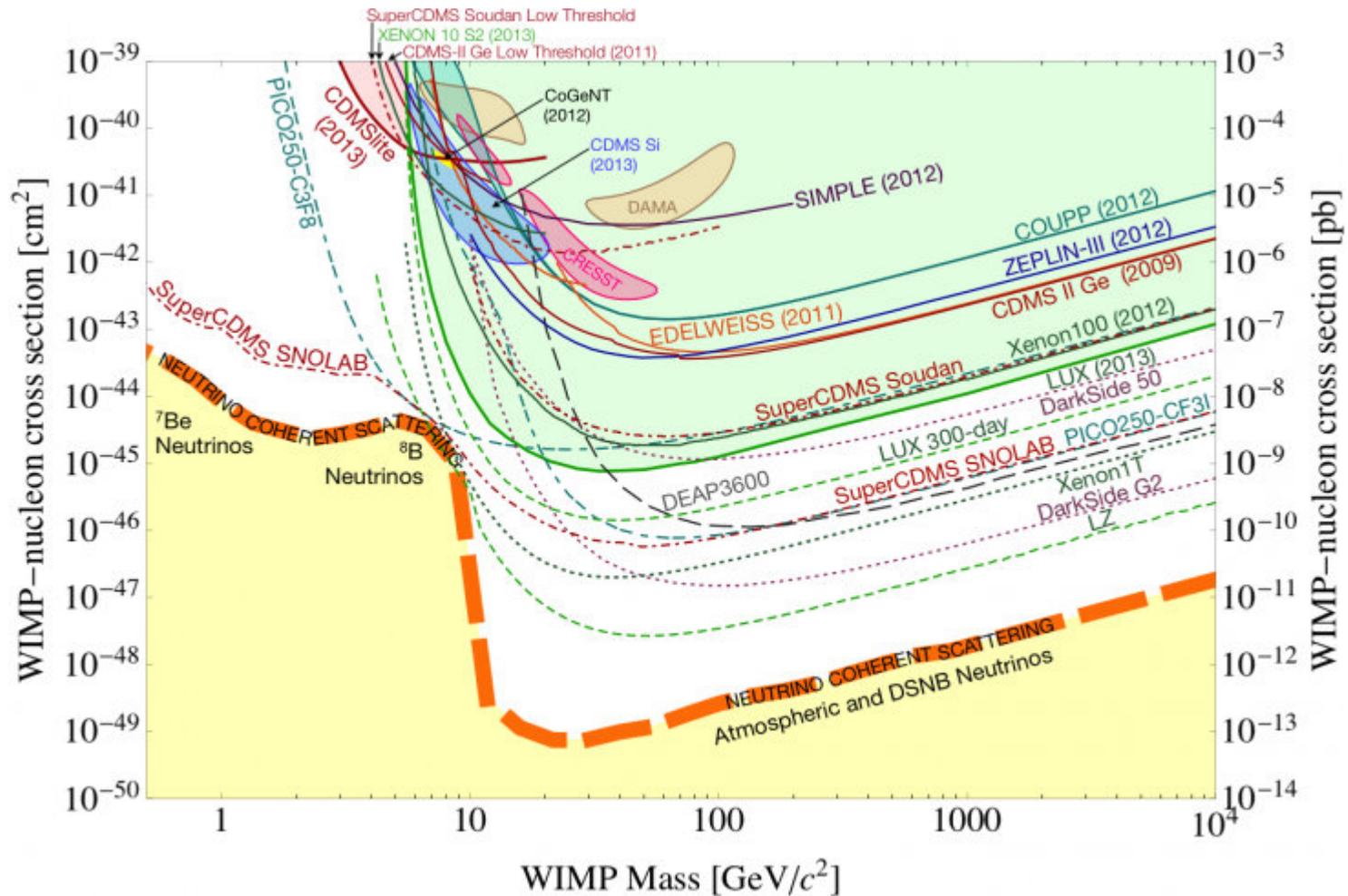
(In)direct MDM detection

Indirect Detection

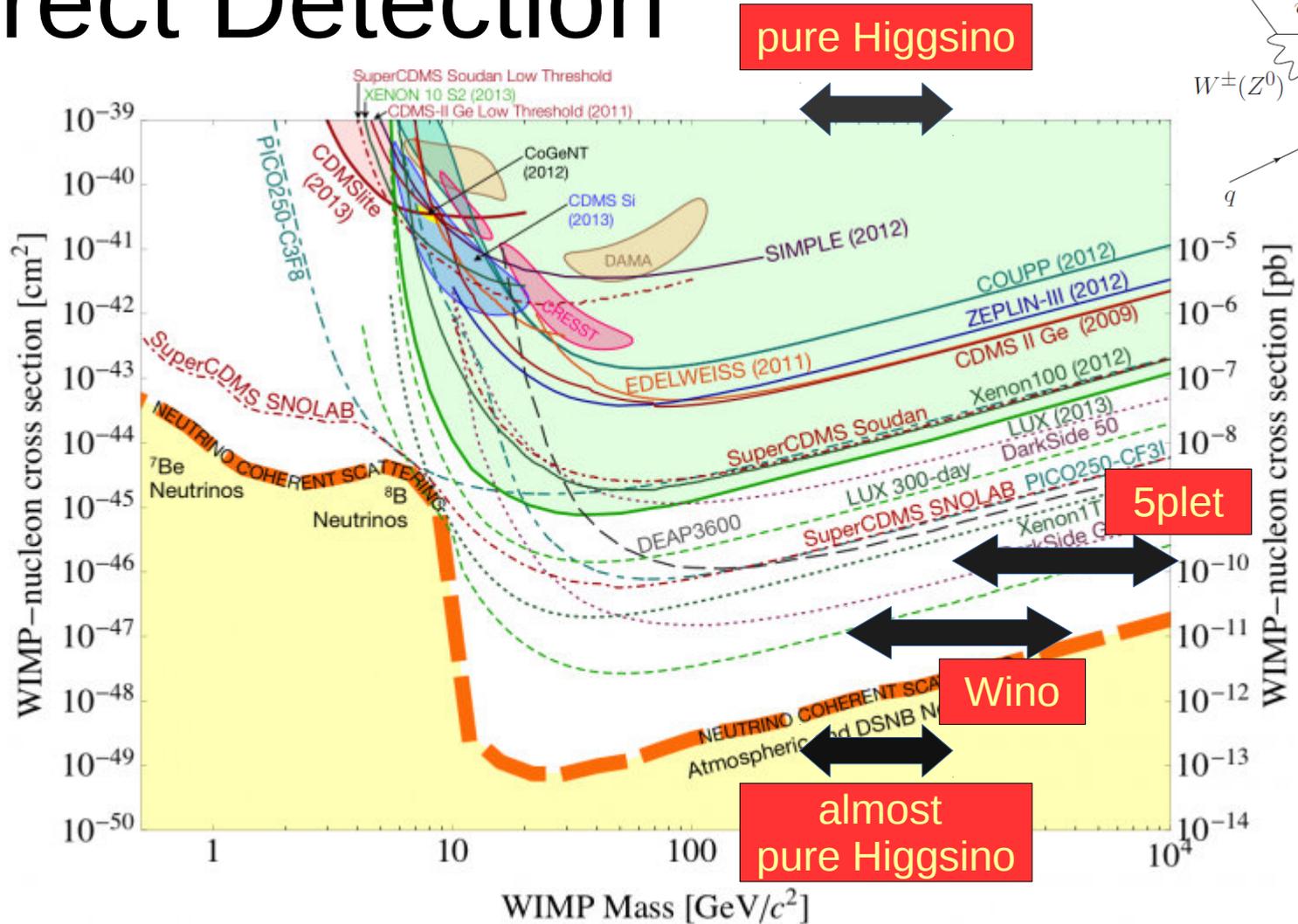


仮定:MDMが100%全ての暗黒物質を占めている

Direct Detection



Direct Detection



仮定:MDMが100%全ての暗黒物質を占めている

Discussion

- Direct / Indirect 探査は非常に強力
 - CTAやDarwin実験は殆どのMDMをカバーできそう。
- 宇宙線のスペクトルや直接検出の反応レートからDMの質量や量子数の情報を得ることも出来る
- ただし、astrophysicalな不定性が非常に怖い
 - 暗黒物質の密度分布
 - 宇宙線の伝播モデル、バックグラウンドなど
- またMDMが全暗黒物質を占める必要とは限らないことも留意
 - 典型的にはaxion DMも混ざったmixed DM シナリオ
 - Direct/Indirectのreachはかなり下がる

Outlook

- 1 TeV Higgsino, 3 TeV wino, 10 TeV 5pletを現状のLHCで探るのは難しい
 - 新しい観測量などアイデアが必要
- Direct/Indirectの探査結果が将来の加速器計画に非常に重要
 - High energy upgrade of LHC for Higgsino, Wino
 - O(100) TeV Collider for 5plet
- Astrophysical不定性を落とすための手法を開発
- DM の観測量の理論計算誤差の軽減
 - 現状だと、暗黒物質の残存量や断面積にかなりの不定性が存在