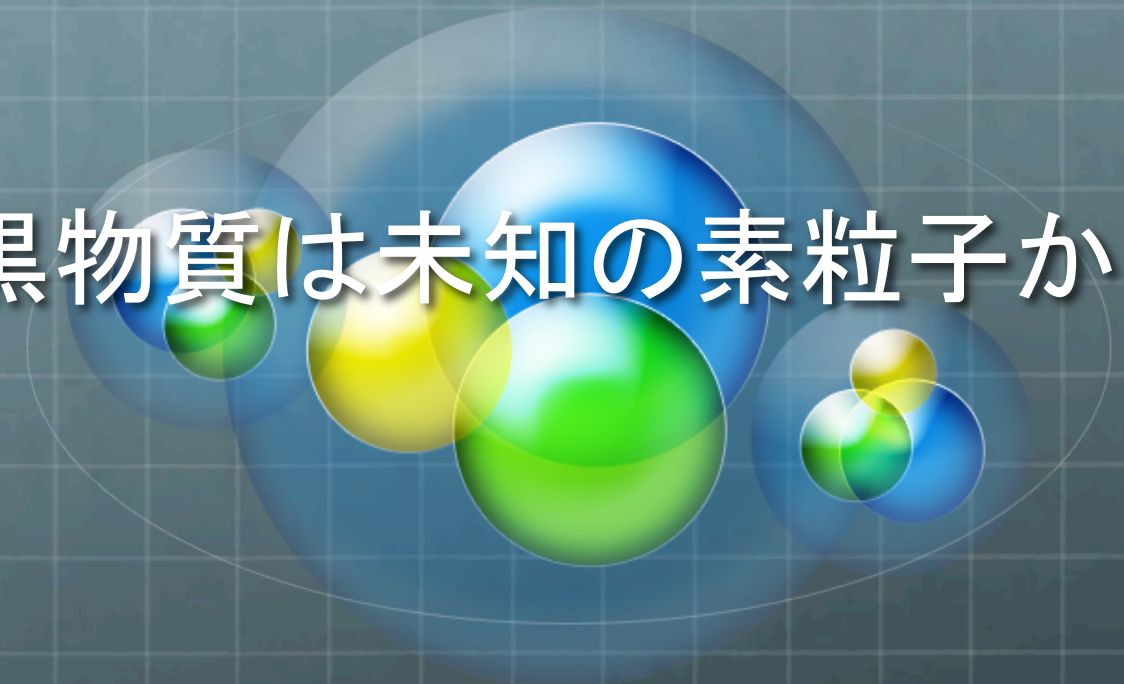




暗黒物質は未知の素粒子か？

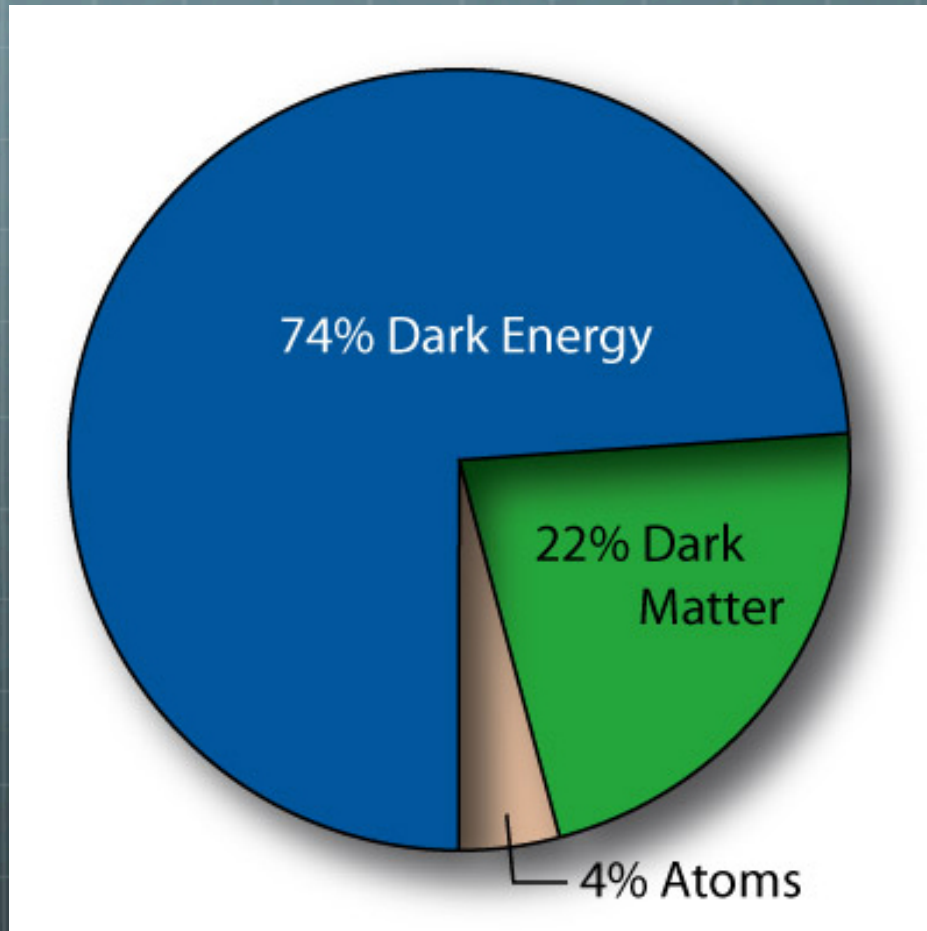
久野純治(名古屋大学)

第11回高宇連研究会「多波長で探る高エネルギー現象」
2011年8月9日(火) -- 8月11日(木) 早稲田大学55号館N棟大会議室

今日の内容

- 暗黒物質と素粒子模型
- 暗黒物質の正体を探る
 - 加速器による直接生成
 - 地上での直接探索
 - 宇宙線観測による間接探索
- まとめ

宇宙の組成



- 宇宙の暗黒物質の正体がなにであるかは物理におけるBig mysteryの1つ。
- **Weakly-Interacting Massive Particle (WIMP)** は冷たい暗黒物質の有力候補。

暗黒物質の熱的残存仮説

WIMP数密度 n の Boltzmann 方程式

$$\frac{dY}{dx} = -\frac{s\langle\sigma v\rangle}{xH}(Y^2 - Y_{\text{EQ}}^2)$$

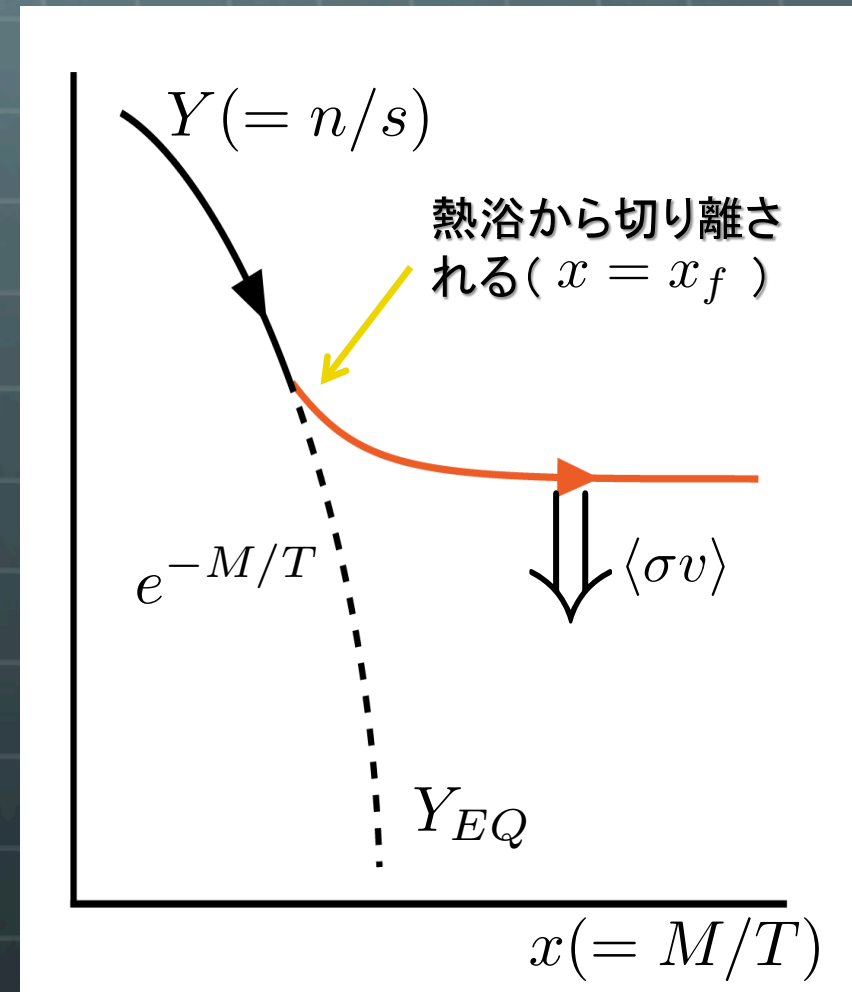
$$(Y \equiv n/s, \quad x \equiv M/T)$$

温度が $\sim M/20$ ($x_f \simeq 20$) 以下になると、WIMPは熱浴から切り離される。

$$Y_\infty \propto x_f / \langle\sigma v\rangle$$

WIMP対消滅がS波過程ならば、

$$\Omega_{\text{DM}} = 0.23 \times \left(\frac{3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}}{\langle\sigma v\rangle} \right)$$



TEV

- 100GeVから1TeV程度の質量をもつWIMPは暗黒物質のよい候補

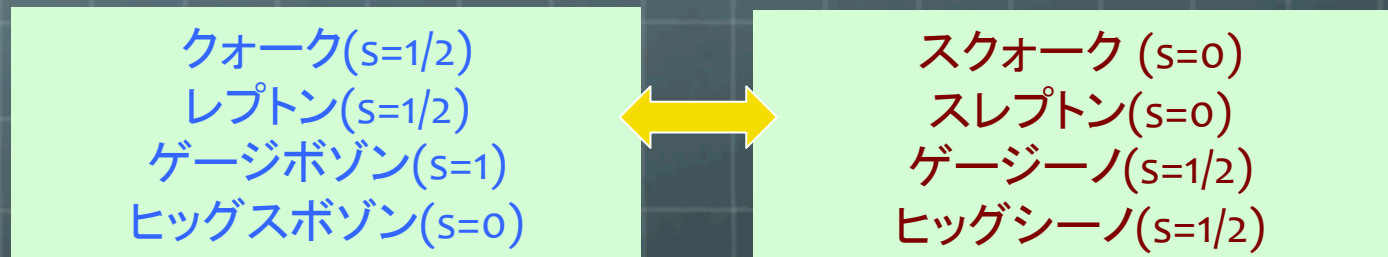
$$\sigma v \sim \pi \frac{\alpha^2}{M^2} = \pi \frac{(1/127)^2}{(300\text{GeV})^2} = 3 \times 10^{-26} \text{cm}^3/\text{s}$$

- 素粒子標準模型のヒッグスセクターの持つ「自然さの問題」から100GeVから1TeV程度のエネルギースケールにnew physicsがあることを期待。

$$m_h^2|_{\text{phys}} = m_h^2|_{\text{bare}} + \text{[dashed loop]} + \text{[solid loop]} + \dots$$

超対称標準模型

- 超対称性: ボゾンとフェルミオンの対称性
- 超対称標準模型: 超対称粒子の導入



- R パリティの導入(陽子の安定性)

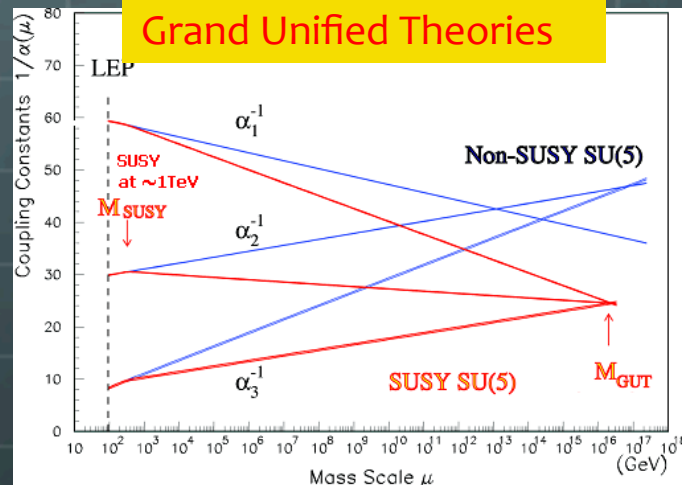
標準模型粒子: 偶

その超対称粒子: 奇

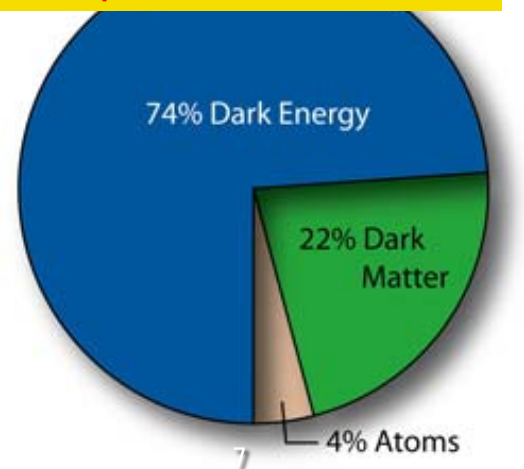
最も軽い超対称粒子は安定となり、暗黒物質の候補

超対称標準模型

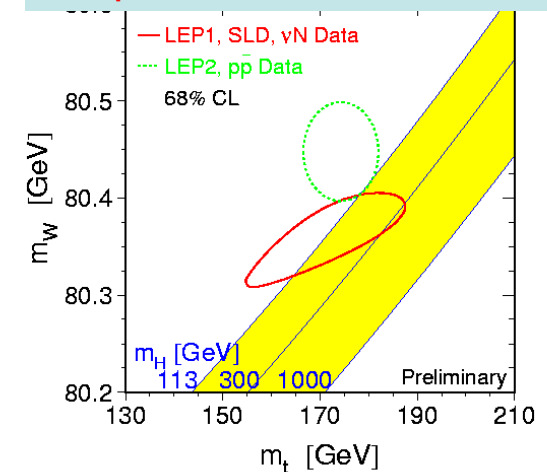
- ヒッグスの質量項の自然さの問題の解決
- ゲージ結合定数の統一
- 軽いヒッグスボソンを予言
- 暗黒物質を予言



Composition of Universe



EW precision measurement



ニュートラリーノ

- 超対称標準模型におけるダークマター候補

$$\chi = c_B \tilde{B}^0 + c_W \tilde{W}^0 + c_{H1} \tilde{H}_1^0 + c_{H2} \tilde{H}_2^0$$

ビーノ

ウィノ

ヒッグシーノ

- ニュートラリーノはMajoranaフェルミオンであるため、Zボゾンとのベクター結合がない。スニュートリノはベクター結合があり暗黒物質直接探索により簡単な模型は否定。
- ニュートラリーノの主成分がなにであるかは超対称性の破れの起源次第。

非熱的暗黒物質生成

- 必ずしも暗黒物質の熱的生成仮説は素粒子模型とフィットがいいとは限らない。

- 1, 長寿命粒子(例、グラビティーノ)の存在を予言。

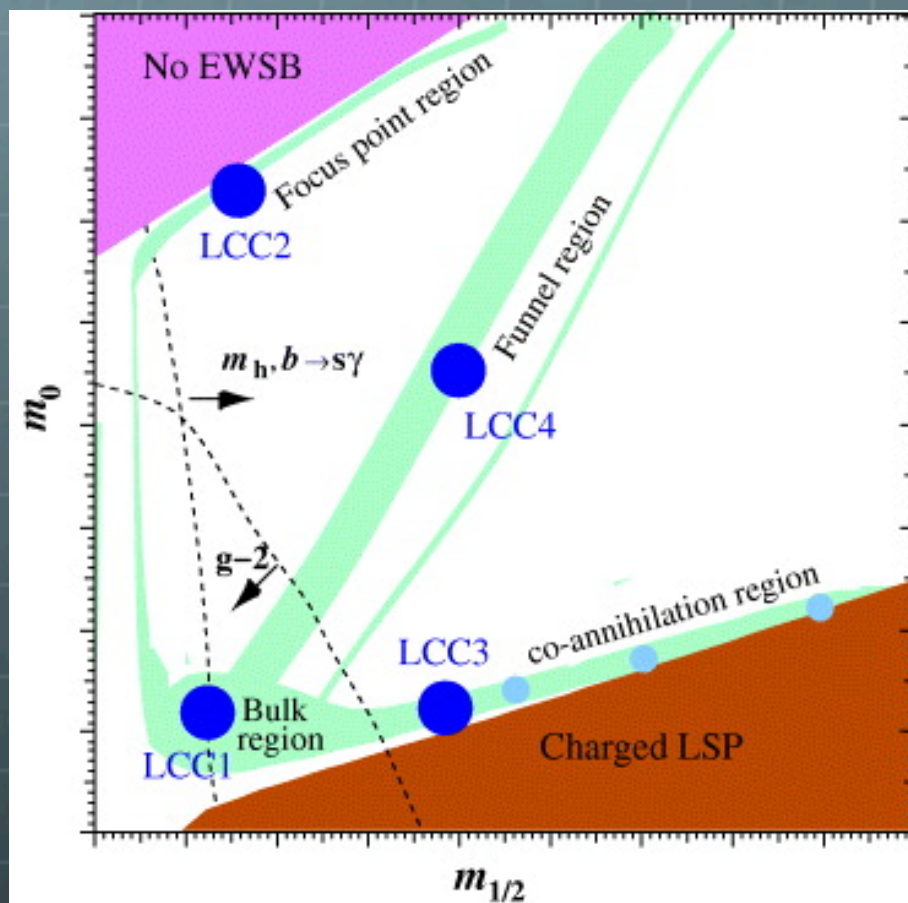
- 2, 非常に限られたパラメータでのみ観測を説明。

- 凍結温度以下 ($T < T_f (\sim M/20)$) での非熱的な暗黒物質生成の可能性。

$$\begin{aligned}\Omega_{\text{DM}} &< \Omega_{\text{DM}}^{\text{thermal}} \times (T_f/T) \\ &< 0.2 \times \left(\frac{M}{200\text{GeV}} \right) \left(\frac{3 \times 10^{-24}\text{cm}^3/\text{s}}{\langle \sigma v \rangle} \right) \left(\frac{100\text{MeV}}{T} \right)\end{aligned}$$

CMSSMのパラメータ領域

(CMSSM:Constrained minimal supersymmetric standard model)



Point	m_0	$m_{1/2}$	$\tan \beta$	A_0	sign μ
LCC1	100	250	10	-100	+
LCC2	3280	300	10	0	+
LCC3	213	360	40	0	+
LCC4	380	420	53	0	+

LSP annihilation channel

LGC1: bulk region

LGC2: $\chi\chi \rightarrow WW$

due to bino-Higgsino mixing

LGC3: bino-stau coannihilation

LGC4: Higgs pole

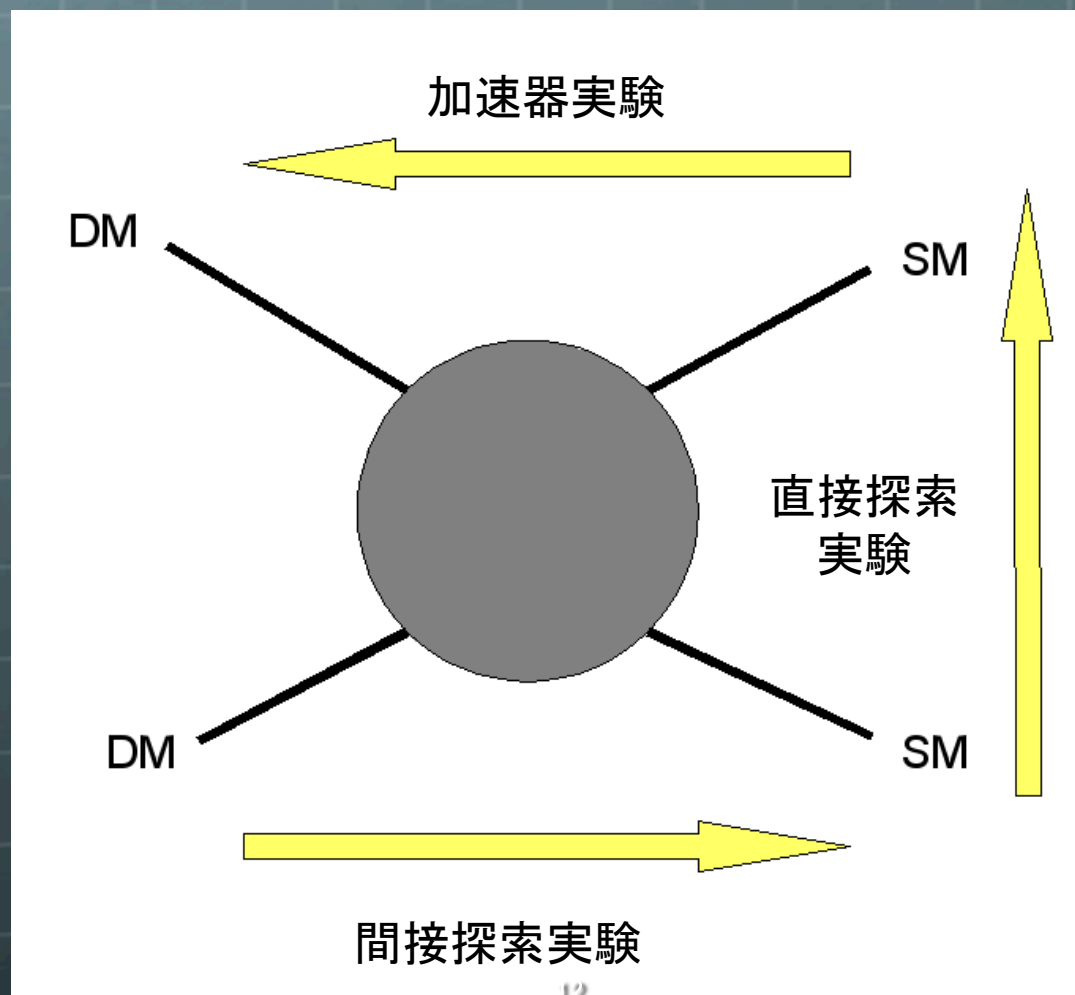
(Battaglia, 09)

素粒子模型における 暗黒物質候補

- 超対称標準模型におけるニュートラリーノ
- 余剰次元模型のKaluza-Klein photon
- Little Higgs模型のT-odd photon
-
-

超対称模型は標準模型を超える理論のひな形。

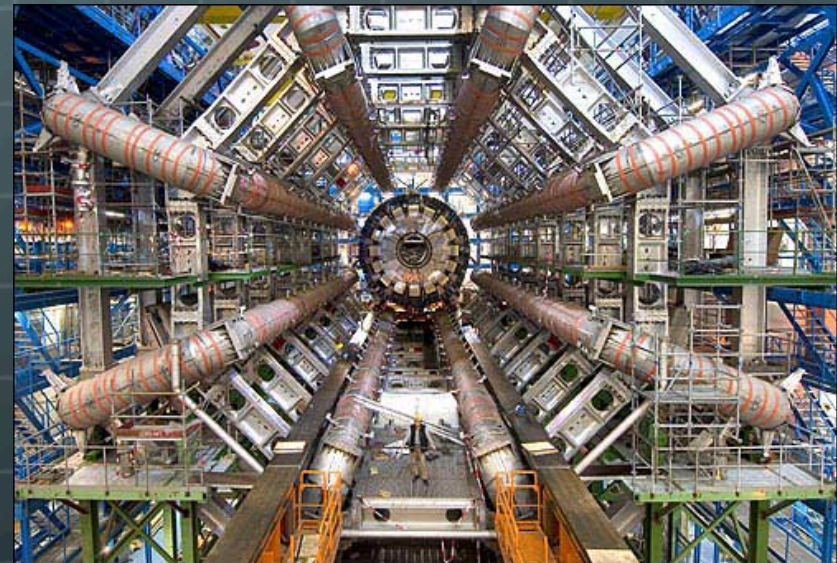
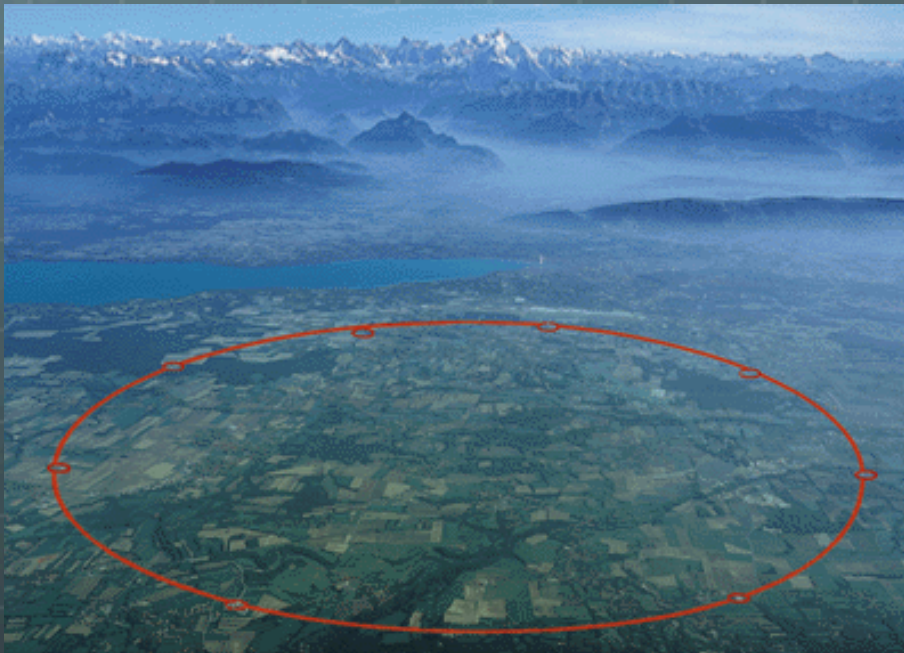
暗黒物質の正体を暴く



WIMP探索(直接生成)

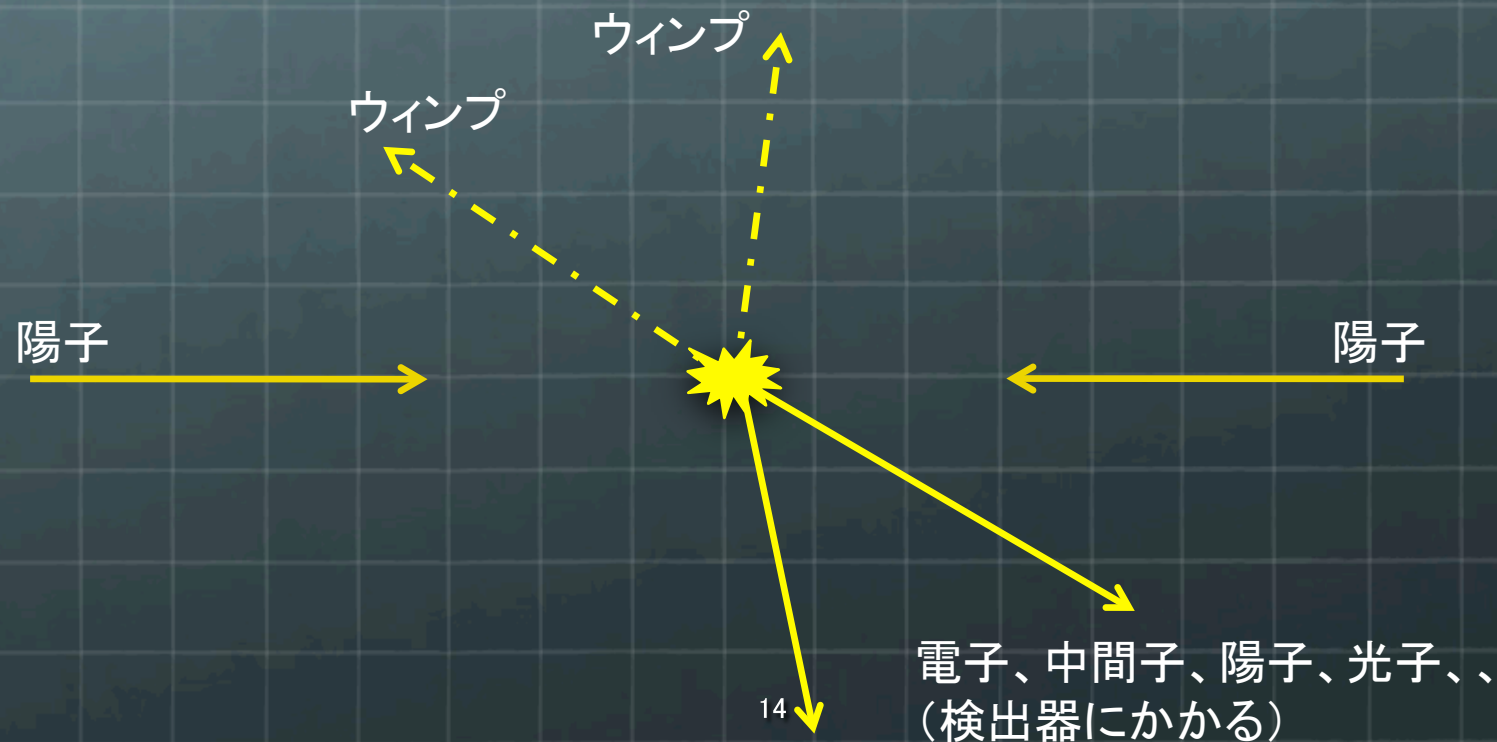
LHC実験:陽子・陽子衝突実験

2010より本格的に7TeVでスタート。



WIMP探索(直接生成)

- LHC実験:陽子・陽子衝突実験
- 運動量が保存していないイベントを探す。
(ウィンプ自体は検出器にかからない)



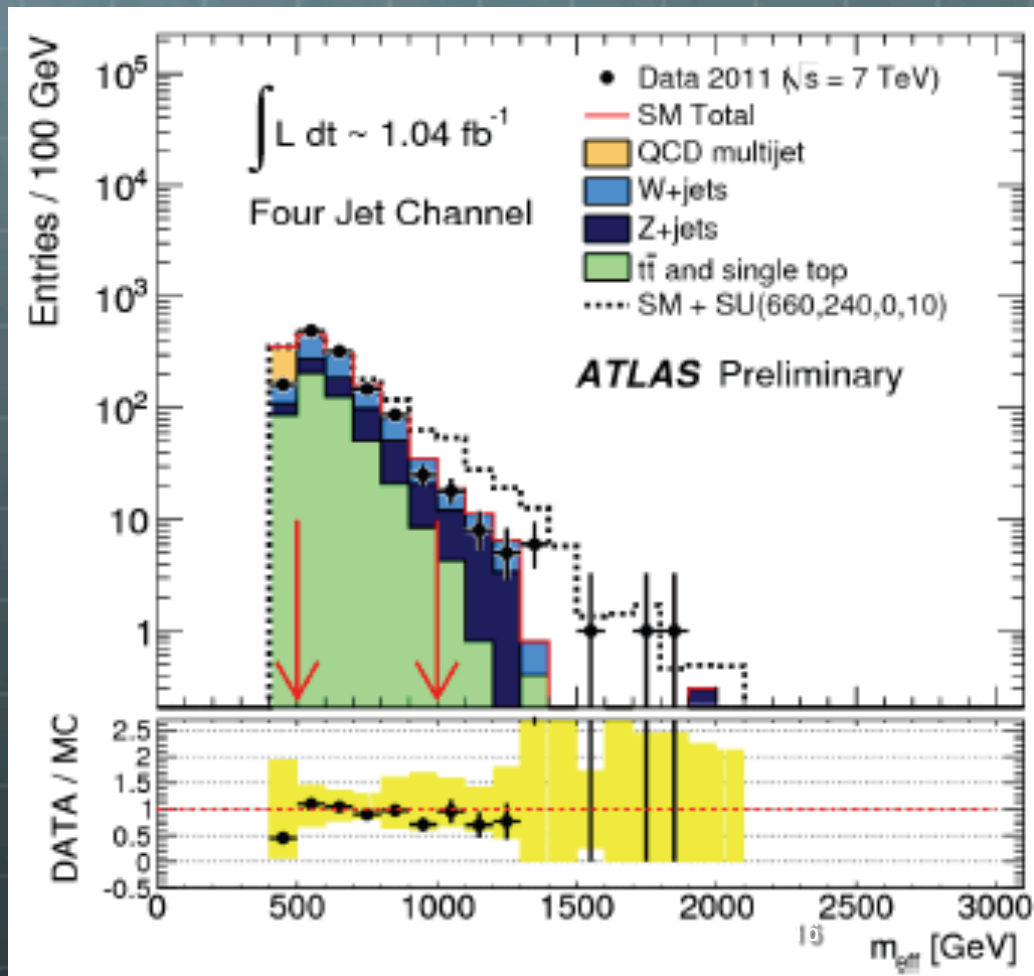
WIMP探索(直接生成)

- LHC実験: 陽子・陽子衝突実験
- 運動量が保存していないイベントを探す。
(ウィンプ自体は検出器にかからない)

Channel	Signature	Main backgrounds
0 lepton + jets + E_T^{miss}	≥ 2 -4 jets, large E_T^{miss} , $m_{\text{eff}}^{(*)}$	W/Z+jets, top, QCD
1 lepton + jets + E_T^{miss}	e/μ , ≥ 3 jets, large E_T^{miss} , m_{eff} , m_T	Top, W/Z+jets, QCD
2 leptons (SS/OS) + E_T^{miss}	2 e/μ , large E_T^{miss}	SS: Fakes, diboson, top OS: top, Z+jets
≥ 3 leptons + E_T^{miss}	≥ 2 jets, E_T^{miss} , $m_{l^+l^-} \neq m_Z$	Z+jets, top
0 lepton + b-jets + $E_T^{\text{miss}(**)}$	1-2 b-jets, m_{eff}	Top, W/Z+jets, QCD
$\gamma\gamma$ + E_T^{miss}	2 γ , E_T^{miss}	QCD, top, $W\gamma$ +jets
+ more targeted analyses for SUSY scenarios with featured not covered by above inclusive searches. See exhaustive list on slide 21		

WIMP探索(直接生成)

🌐 Jets+missing Etイベント探索



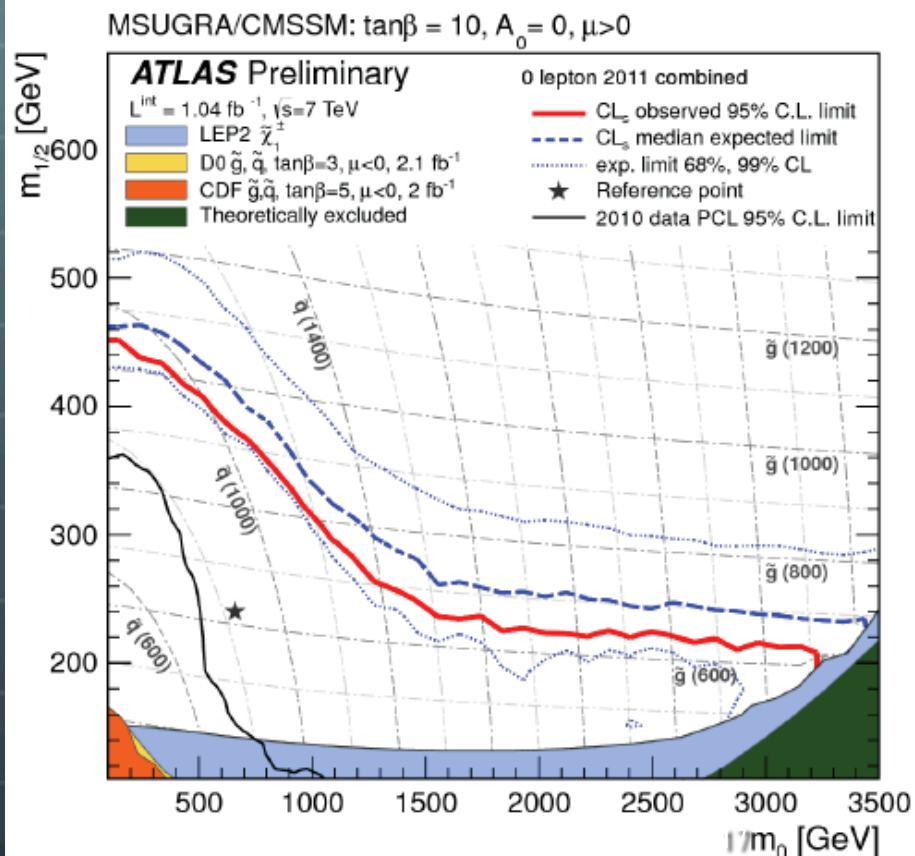
横軸:

$$m_{\text{eff}} \equiv \sum_{i=1}^n |\mathbf{p}_T^i| + E_T^{\text{miss}}$$

WIMP探索(直接生成)

🌐 Jets+missing Etイベント探索

MSUGRA/CMSSM $A_0=0$, $\tan\beta=10$, $\mu>0$

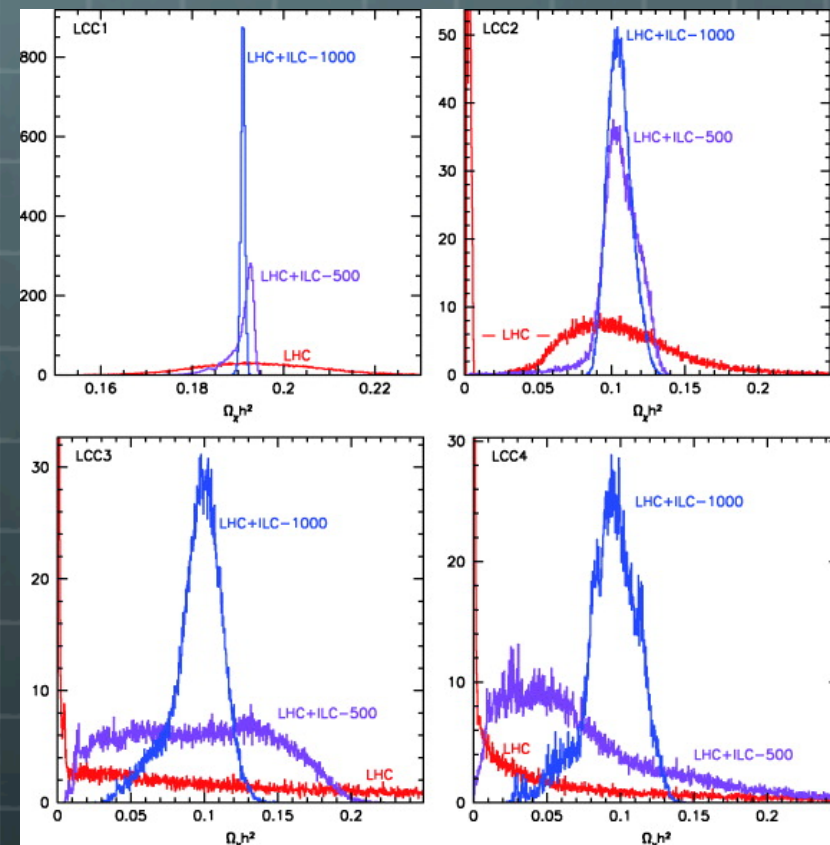
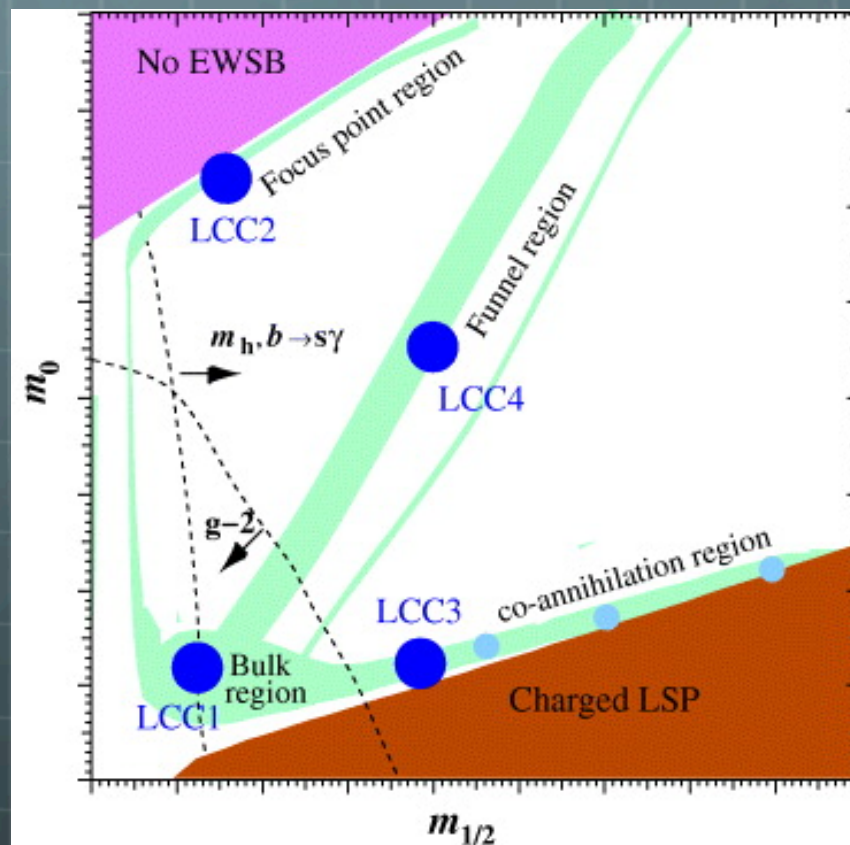


$m_{\tilde{g}} = m_{\tilde{q}}$ とした
とき質量の下限は
980GeV(95%CL)

ただし、この制限
は模型に強く依存。

$\Omega_{\text{DM}} h^2$ の決定

- LHCでは十分な精度がでない。LCが必要。



(Baltz et al, 06)

WIMP探索（直接探索）

- 🌐 WIMPは我々の周りを飛び回っている。

重さ：約百GeVから数TeVくらい

速度：秒速200キロ(光速の0.1%)

数：1平方メートルに約千個(0.3GeV/cc)

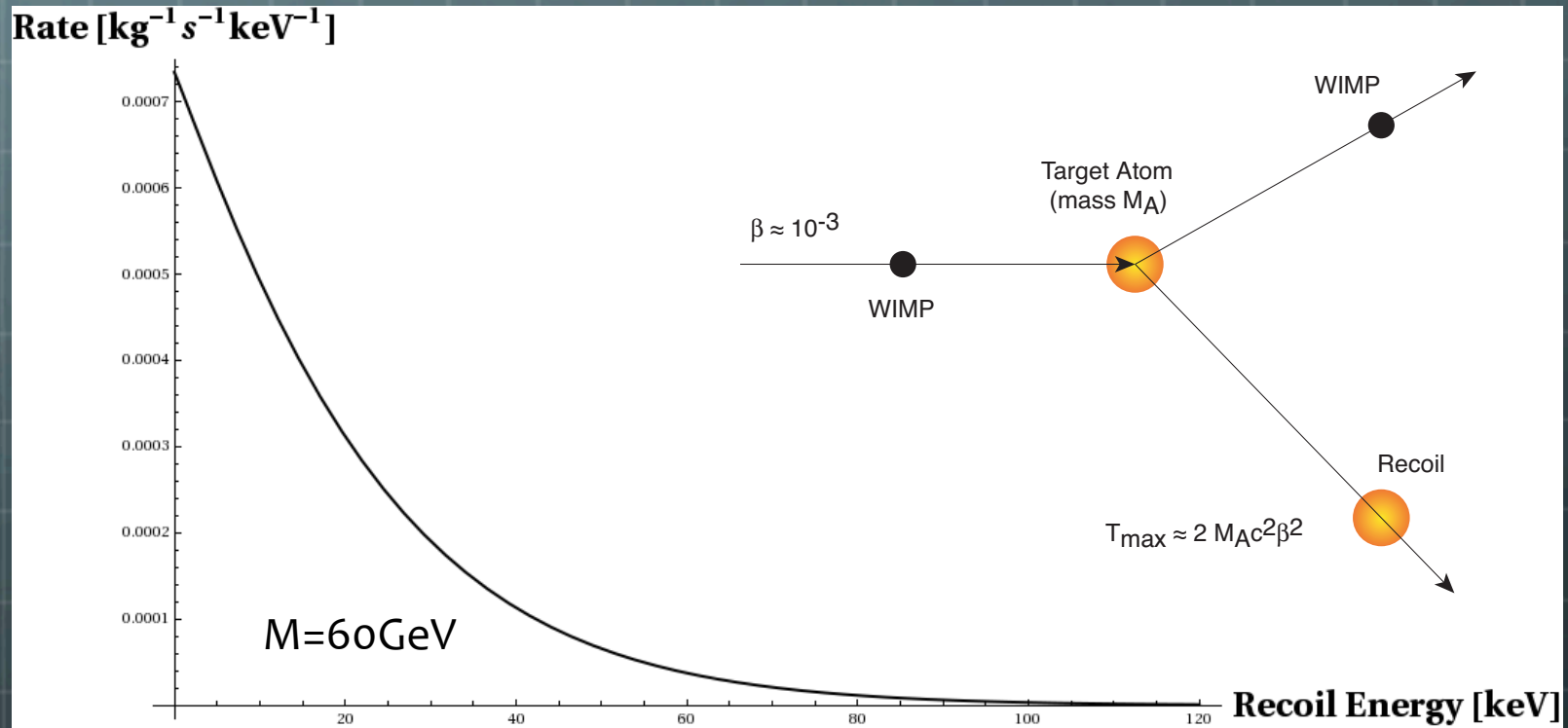
ほとんどは我々をすり抜けていく。



- 🌐 ごくごくわずかな確率で原子核とぶつかり、はじかれた原子核がわずかな熱、光、電流を発生する。ウィンプ直接探索ではそのわずかなシグナルを探す。

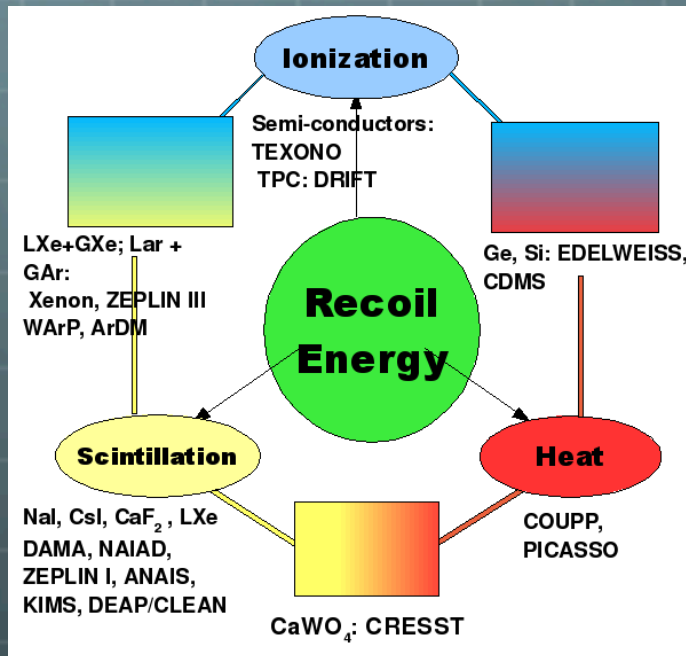
WIMP探索（直接探索）

数10KeVの反跳原子核を捕らえる。



WIMP探索(直接探索)

🌐 現在世界中で競争。



🌐 日本ではXMASS実験
が稼働開始。



30以上の実験

Current and Future direct WIMP Search experiments 35 programs (not complete list : sorry for those projects I have missed)

Experiment s	site	Target & mass	technology	Achieved (cm ²)	Sensitivity (cm ²)	Status & comments	Year to start
Xenon							
ZEPLIN-III	Boulby	Xe: 8kg	two phase		SI: 10 ⁻⁴³	Stop in 5- 2011	results soon
XENON100	LNGS	Xe: 48kg	two phase		SI: 7x10 ⁻⁴⁵		On going
XENON1T	LNGS	Xe: 1t	two phase		SI: 10 ⁻⁴⁷		2015
XMASS	Kamioka	Xe: 100kg	single phase		SI: 10 ⁻⁴⁵	commissioning	On going
XMASS-1.5	Kamioka	Xe: 1ton	single phase		SI: 10 ⁻⁴⁶		2013
XMASS-II	Kamioka	Xe: 10ton	single phase		SI: 10 ⁻⁴⁷		2016
PANDA-X	Jing Ping	Xe: 25kg	two phase		SI: 10 ⁻⁴⁵		> 2013
LUX	SUSEL	Xe: 100kg	two phase		SI: <10 ⁻⁴⁵	Surface lab	2012
LZS	SUSEL/ SNO	Xe: 1ton	two phase		SI: 10 ⁻⁴⁷		2015
Ar							
WARP	LNGS	Ar:140kg	two phase		SI: 5x10 ⁻⁴⁵	commissioning	
DarkSide50	LNGS	DAr: 50kg	two phase		SI: 10 ⁻⁴⁵	prototype	
ArDM	Canfranc	Ar: 850kg	two phase			Prototype	2011
DEEP3600	SNOLAB	Ar: 1ton	Single phase		SI: 10 ⁻⁴⁵		2012
MiniCLEAN	SNOLAB	Ar: 150kg	Single phase		SI: 10 ⁻⁴⁴		2011
DARWIN	Europe	Ar or Xe: tons	two phase		SI: <10 ⁻⁴⁷		
MAX	DUSEL	Ar and Xe			SI: <10 ⁻⁴⁷	R&D	

11/07/26

Y. Suzuki@EPS-HEP2010 in Grenoble

28

	technology	Sensitivity (cm ²)	Achieve (cm ²)	Status & comments	Year to start
g	char+phonon	SI: 5x10 ⁻⁴⁵			2011
0kg	char+phonon	SI: 3x10 ⁻⁴⁶			2015
	charge			installation	2011
10 kg	charge	SI: 10 ⁻⁴³		1kg test	
0.6kg	BC	SD: 2x10 ⁻³⁷			On going
26 kg	BC			Test 0.2kg	Install 2012
	BC			4kg test	2011
0kg	Scintillation	SI: 10 ⁻⁴⁰			On going
1.4kg	Scintillation	SD:10 ⁻³⁸			On going
	Scintillation			R&D	
	Scintill+phonon				On going
tc.	Scintill+phonon			R&D	
00kg	Scintillation	Test DAMA		Prototype: 17kg	?
1ton	many	SI: 10 ⁻⁴⁶		Phase-I: 150kg	2015

Tracking

Drift-III	Boulby	CS2:4kg,24m ³	TPC	SD: 10 ⁻⁴⁰		?
DM-TPC		CF4	PMT+TPC		Prototype test	
NewAGE	Kamioka	CF4	microTPC		Prototype test	
MiMac	LSM	CF4	microTPC		Prototype	2011 1m ³
11/07/26	World?		Tracking	Y. Suzuki@EPS-HEP2010 in Grenoble	White paper	

11/07/26

29

WIMP・核子有効相互作用

$$\mathcal{L} = \sum_{N=p,n} f_{\text{SI}} \bar{\chi}\chi \bar{N}N + f_{\text{SD}} \bar{\chi}\sigma_a\chi \bar{N}\sigma_a N$$

- WIMP χ はMajorana fermionであることを仮定。
- SI(spin-independent)相互作用による散乱の事象数は原子数(A)の3乗に比例。大きな原子核を使うことで感度が上がる。

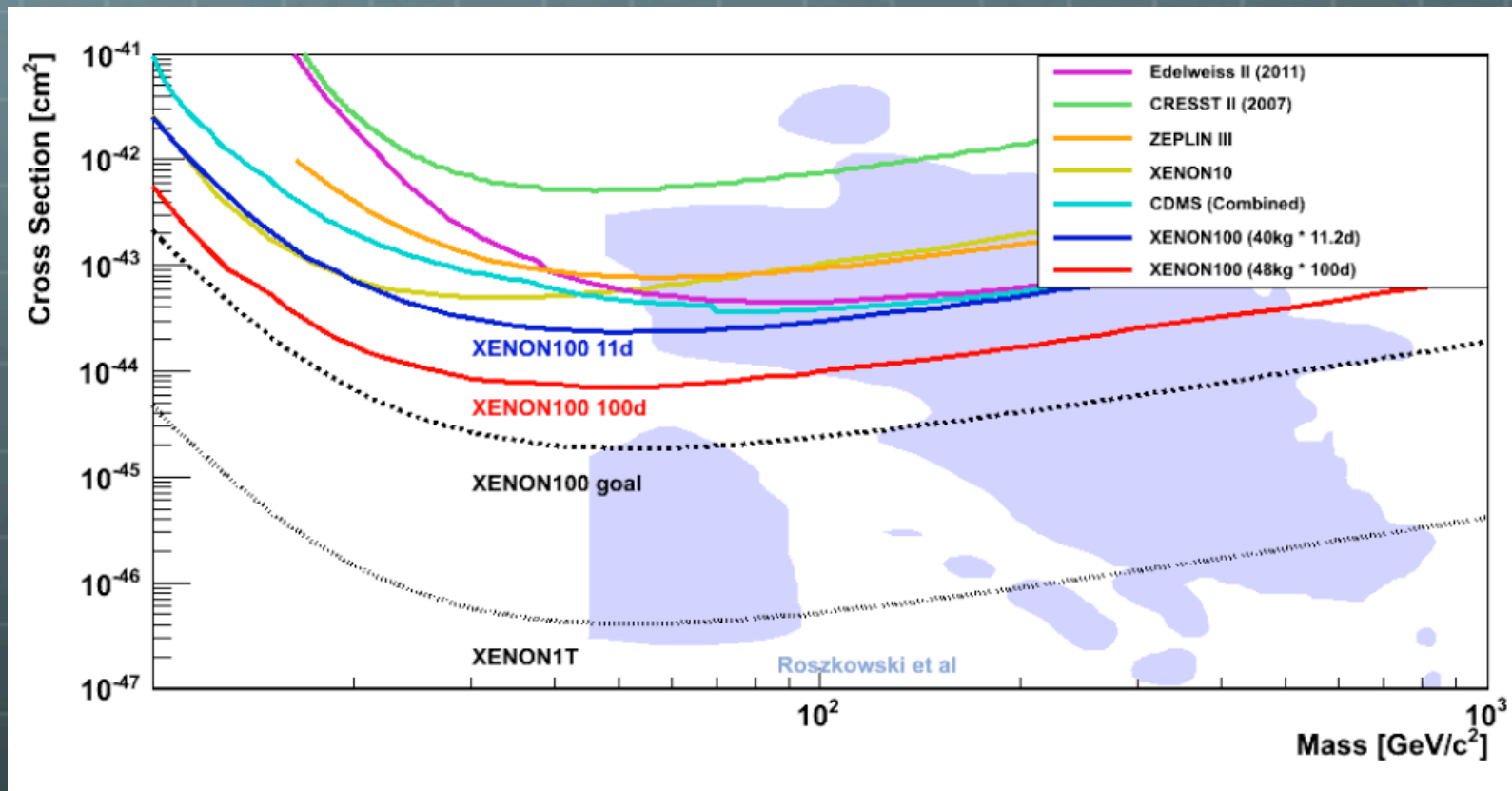
$$\sigma = \sigma_p^{\text{SI}} A^2 \left(\frac{M m_N}{M + m_N} \right)^2 \left(\frac{M m_p}{M + m_p} \right)^2 \sim A^4$$

位相積分

コヒーレント

- SD(spin-dependent)相互作用はスピンの候補に対して感度あり。

WIMP直接探索(SI)

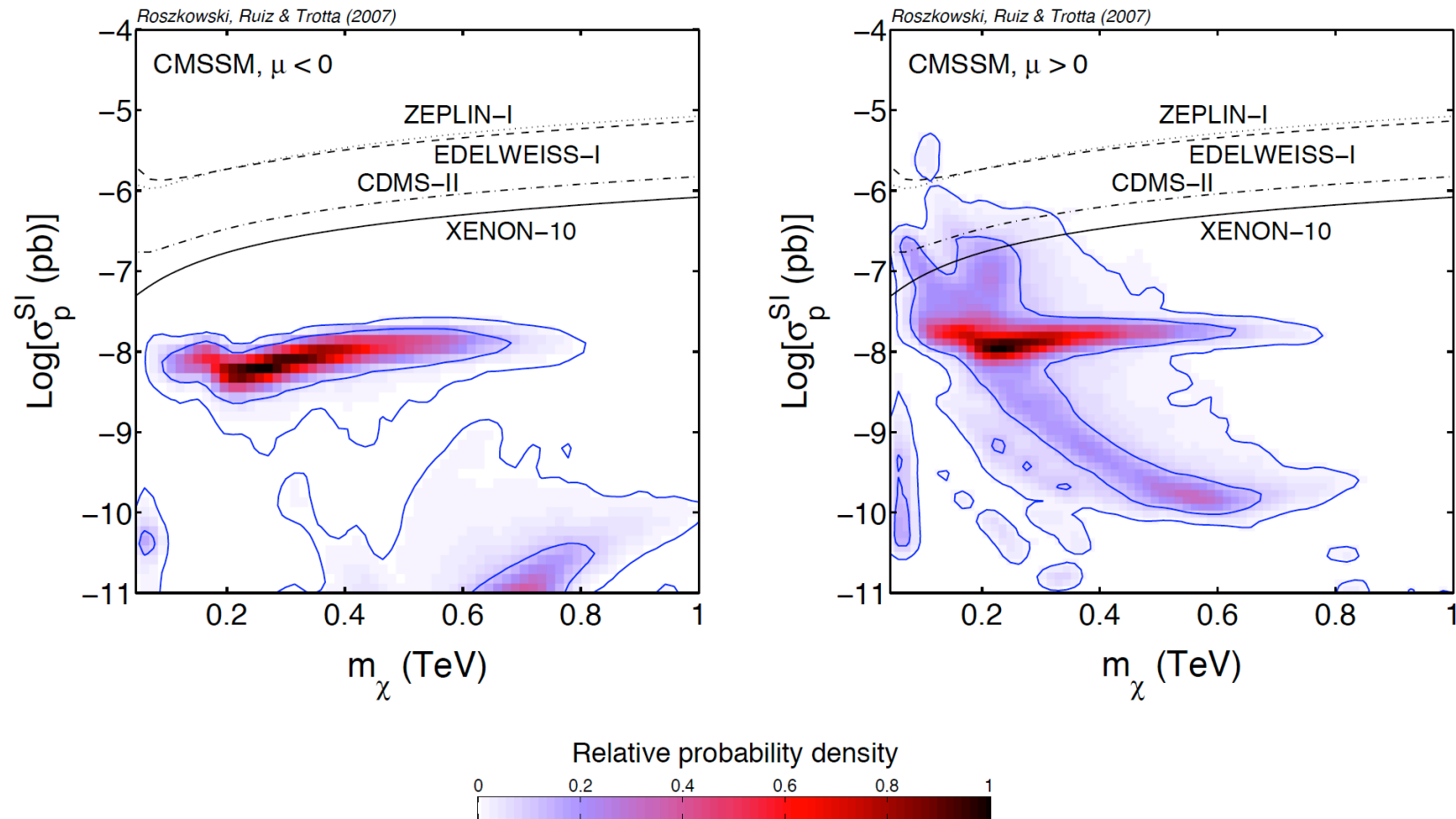


SI相互作用を仮定。XENON100実験により断面積の上限を 10^{-44}cm^2 を切った。

CMSSM

LSPはニュートラリーノ

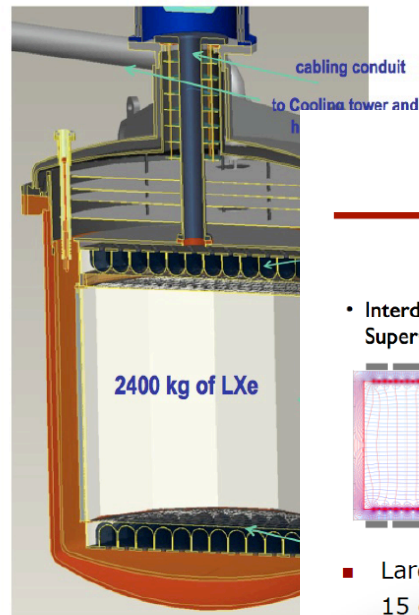
SI相互作用を仮定。(pb= 10⁻³⁶ cm²)



実験の将来計画

XENON future

- XENON-100 to run until end 2010
 - goal 2×10^{-9} pb
 - Improve purification
- XENON-1t (2014, Gran Sasso or LSM)
 - Goal: 3×10^{-11} pb
 - Lower radioactivity PMT (QUPIDs) and cryostat, better purification scheme
- Many other Xenon/Argon programs in coming years: LUX, DEAP-CLEAN, WARP, ArDM, DarkSide
- Longer term: multi-ton expts (DARWIN, LZ)

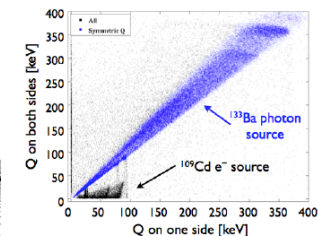
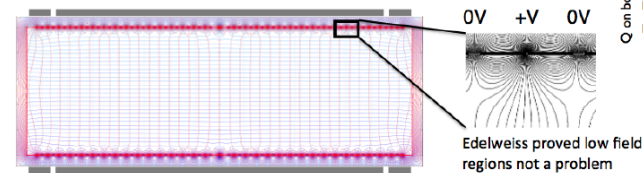


From ICEHP10 (Talk by Gascon)

CDMS future

Improving Background Rejection

- Interdigitated ZIP (iZIP) design meets needs for SuperCDMS SNOLAB and GEODM



- Larger detectors (cost, bkg): 2.5 cm thickness, tests with $\phi = 10$ cm and 15 cm (dislocation-free) $\Rightarrow$ 5 kg units
- Super CDMS @ Soudan : 15 kg (2010-2012) runs with 600g I-ZIP
- Super CDMS @ SNOLAB : 100 kg (2012-2017)
- GeoDM @ DUSEL: 5 T (2017-...)

July 28th, 2010

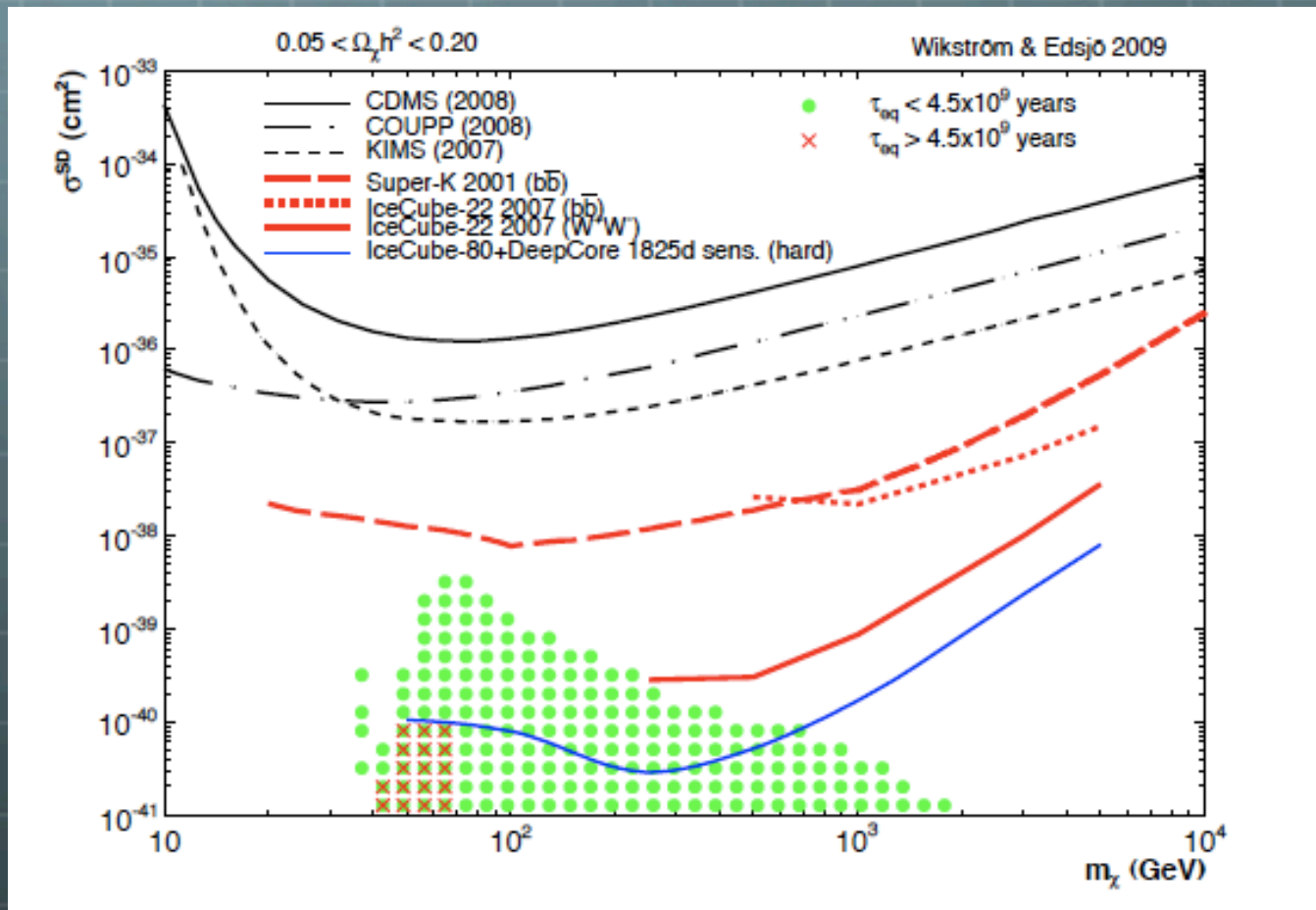
Direct DM Searches - ICHEP - Paris - July 2010

July 28th, 2010

Direct DM Searches - ICHEP - Paris - July 2010

25 25

WIMP直接探索(SD)



SI相互作用を
仮定。

(Wikstrom and Edsjo)

WIMP探索（間接探索）

宇宙線中にWIMP対消滅の痕跡を探る。

🌐 荷電反粒子宇宙線

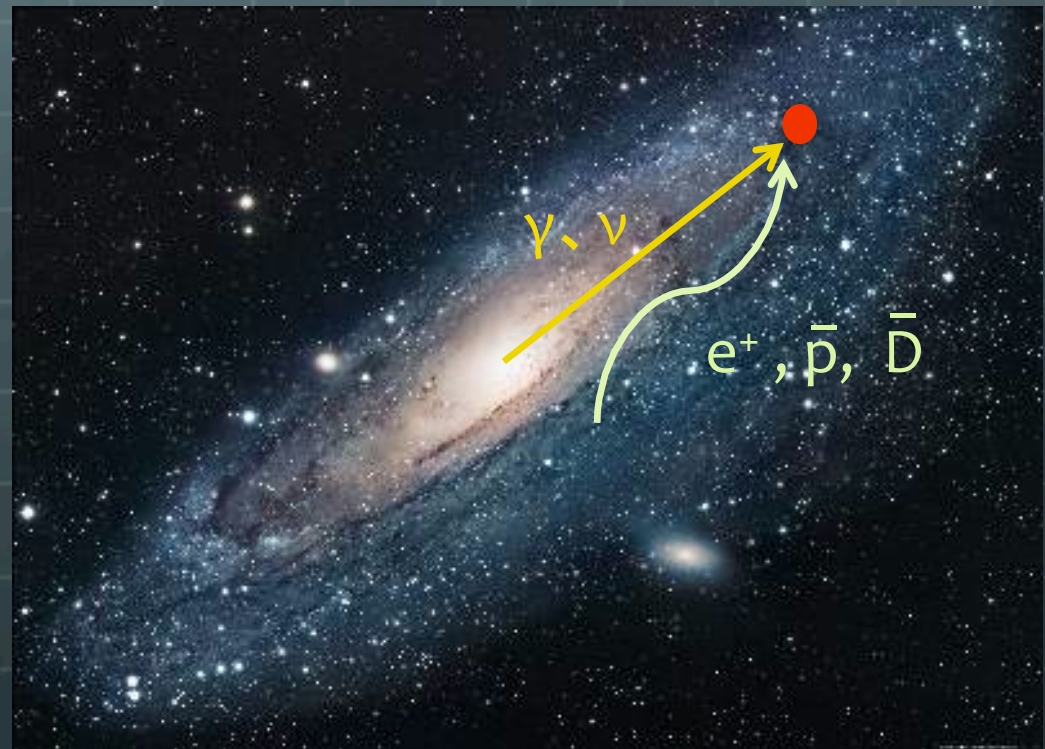
陽電子

反陽子

反重水素

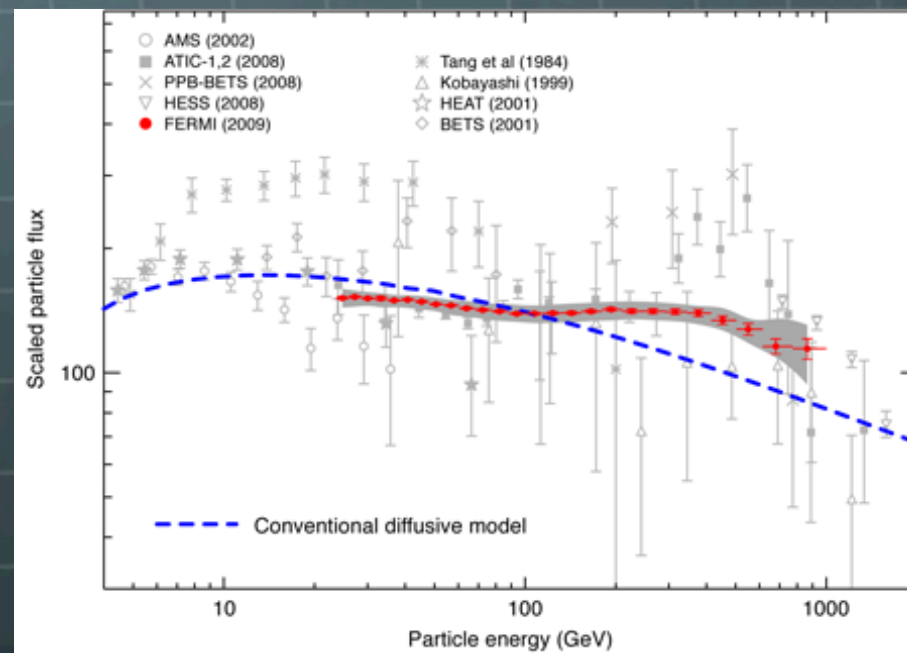
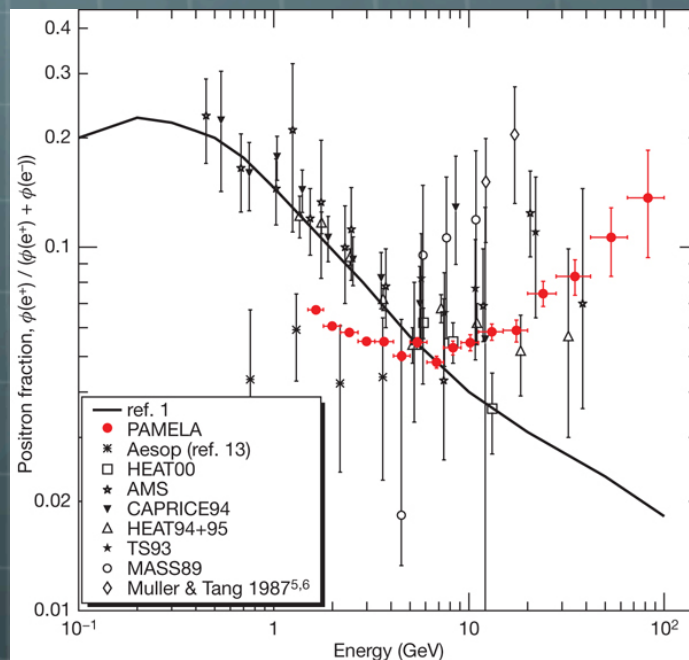
🌐 ガンマ線

🌐 ニュートリノ



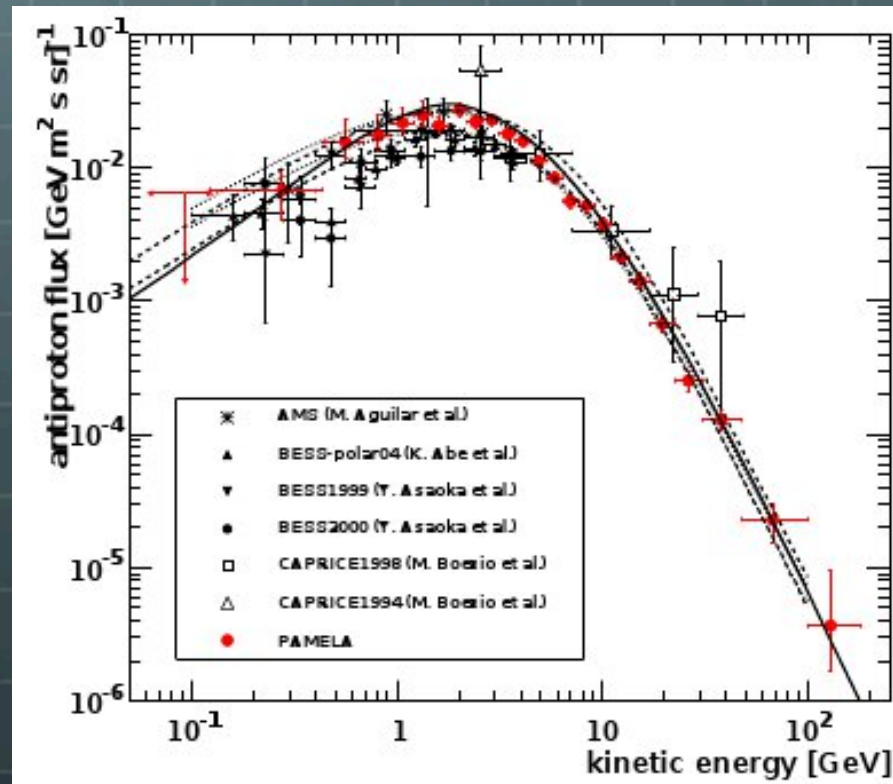
WIMP探索(反粒子宇宙線)

- 🌐 Pamela、Fermiによる陽電子、電子宇宙線にconventional diffusion model からのずれ「異常」がみえる。



WIMP探索(反粒子宇宙線)

- 🌐 Pamelaの反陽子のスペクトラムにはconventional diffusion model の予言に比べ「異常」見えない。

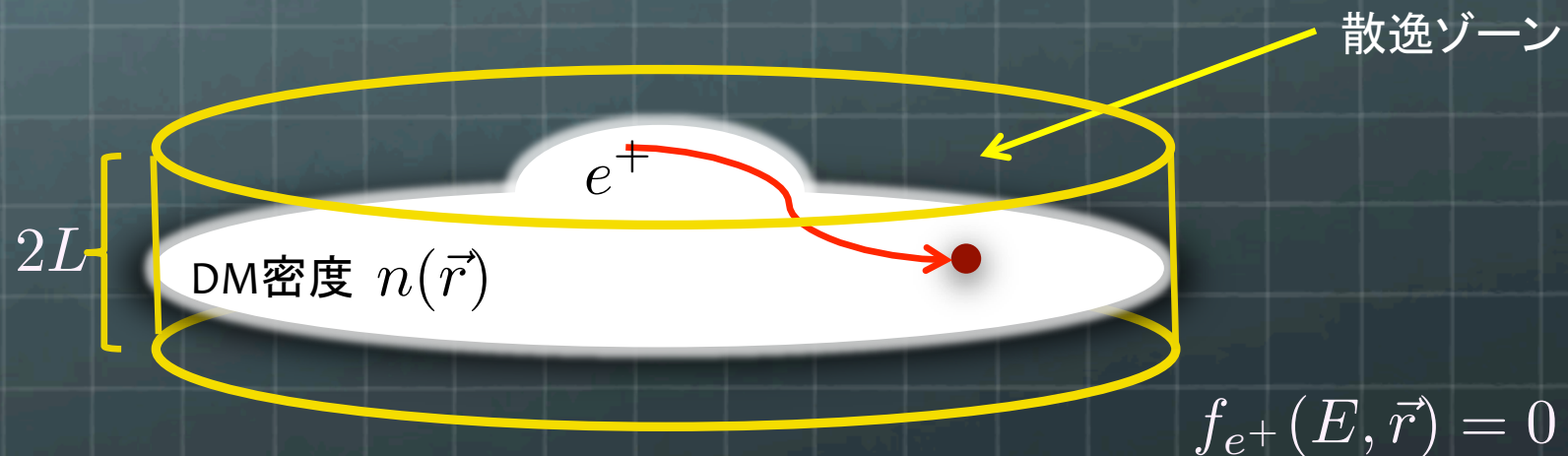


散逸模型

🌐 陽電子の数密度 $f_{e^+}(E, \vec{r})$ の散逸方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} f_{e^+}(E, \vec{r}) = K(E) \nabla^2 f_{e^+}(E, \vec{r}) + \frac{\partial}{\partial E} [b(E) f_{e^+}(E, \vec{r})] + Q(E, \vec{r})$$

$K(E)$ 散逸定数、 $b(E)$ エネルギー損失比、 $Q(E, \vec{r})$ 源項



🌐 定常状態を仮定: $\frac{\partial}{\partial t} f_{e^+} = 0_{31}$

陽電子

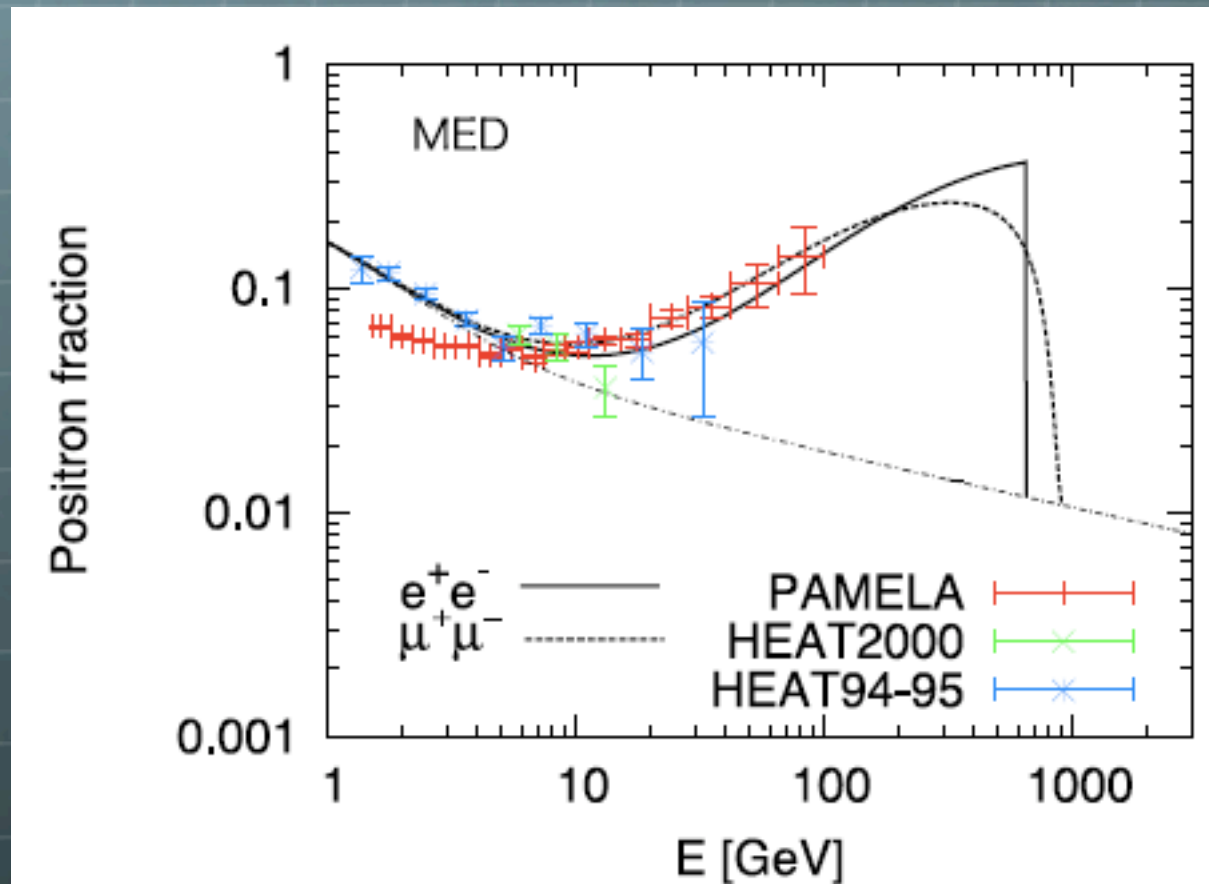
- 陽電子の伝搬距離(エネルギー損失はCMB、starlightとの散乱で決まる)

$$r \simeq \sqrt{\frac{K(E)E}{b(E)}} \sim 2 \times (E/100\text{GeV})^{-0.27} (\text{kpc})$$

- Pamelaアノマリーを説明するには太陽系の近傍にその源が存在する必要がある。

- パルサー
- 超新星
-
- 暗黒物質起源

WIMP起源陽電子



(JH et al)

$$\langle\sigma v\rangle = 5 \times 10^{-24} \text{cm}^3/\text{s}^{-1} \quad M = 650 \text{GeV} \quad (e^+e^-)$$

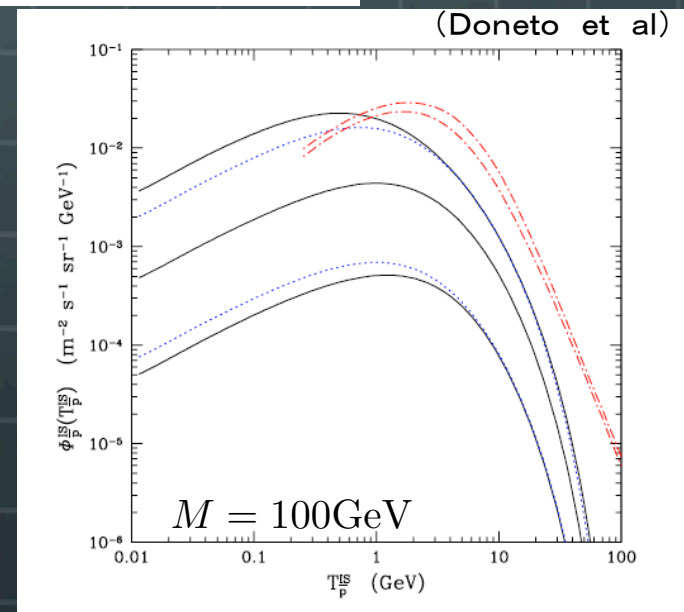
$$\langle\sigma v\rangle = 15 \times 10^{-24} \text{cm}^3/\text{s}^{-1} \quad M = 900 \text{GeV} \quad (\mu^+\mu^-)$$

反陽子

- 🌐 B/C、 $\text{Be}^{10}/\text{Be}^9$ 比などのフィットにパラメータ縮退。(Donato et al)

case	δ	$K_0(\text{kpc}^2/\text{Myr})$	$L(\text{kpc})$	$V_c(\text{km/s})$
max	0.46	0.0765	15	5
med	0.70	0.0112	4	12
min	0.85	0.0016	1	13.5

- 🌐 WIMP起源反陽子流量はLに強く依存。Minをとることで、制限は非常に弱くなる。3本の線はうへの表の3つの場合に対応。



ブースト因子

大きな源項の起源

$$Q(E, \vec{r}) = \frac{1}{2} n^2(\vec{r}) \sum_f \langle \sigma v \rangle_f \left(\frac{dN_{e^+}}{dE} \right)_f$$

天文学的ブースト因子

- clumpy なWIMPの分布

素粒子論的ブースト因子

- 非熱的暗黒物質生成
- 対消滅断面積の速度依存 (WIMPの典型的な速度 $v \sim 10^{-3} c$)

Sommerfeld機構 (JH, Nojiri Matsumoto)

Breit-Wigner resonance機構 (Ibe, Murayama, Yanagida)

WIMP探索(ガンマ線)

反粒子に比べ利点あり。

- 減光がない。
- 光源直接届く
- 散逸模型の不定性がない。
- スペクトラムに特徴がある。

線スペクトラムはsmoking-gun ($E_\gamma \simeq M$)。

$$\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma/\gamma Z$$

ただしループプロセスであるため、断面積は小さい。

FERMI衛星

SEARCH STRATEGIES

Satellites:

Low background and good source id, but low statistics

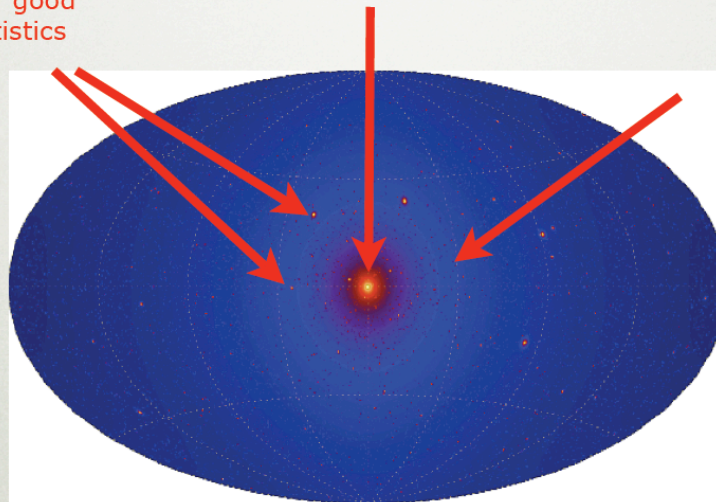
Galactic center:

Good statistics but source confusion/diffuse background

Milky Way halo:

Large statistics but diffuse background

All-sky map of gamma rays from DM annihilation
arXiv:0908.0195 (based on Via Lactea II simulation)



Spectral lines:

No astrophysical uncertainties, good source id, but low statistics

Galaxy clusters:

Low background but low statistics

And electrons!
Anisotropies

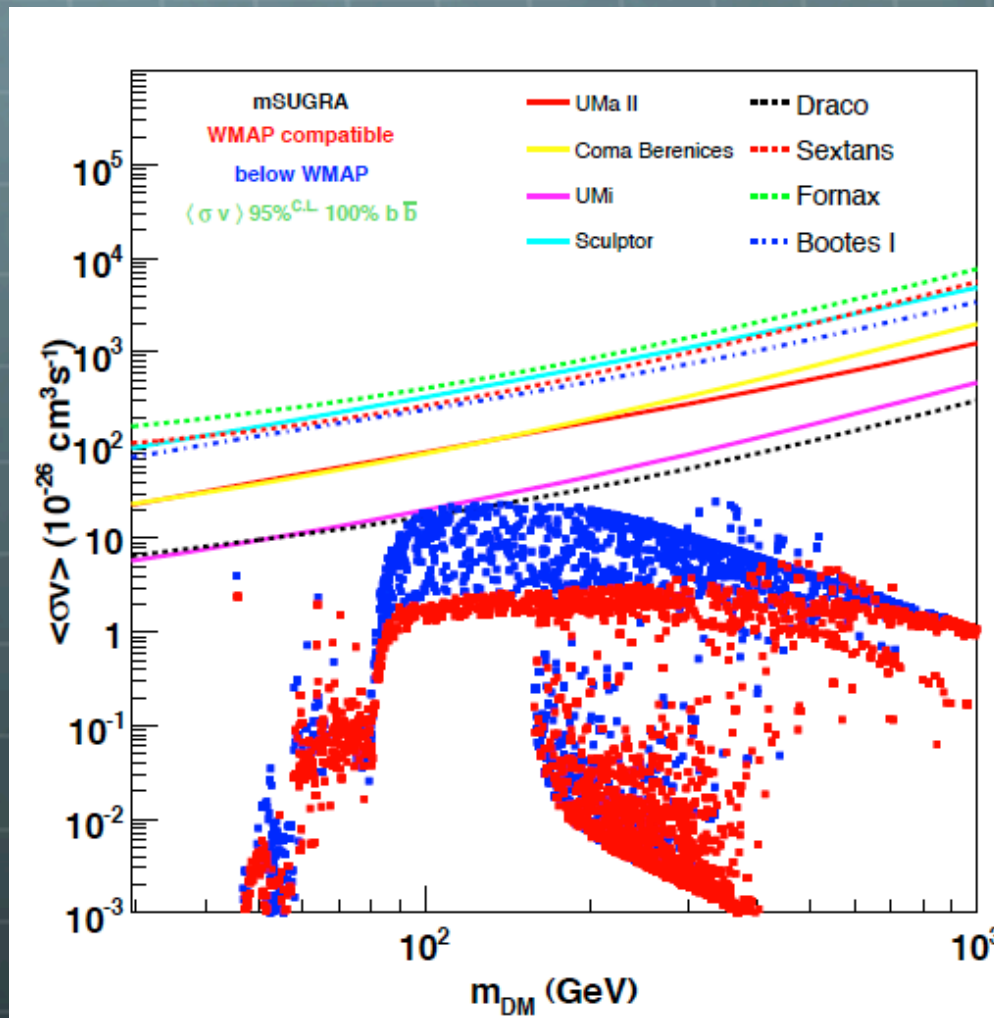
Extra-galactic:

Large statistics, but astrophysics, galactic diffuse background

Pre-launch sensitivities published in Baltz et al., 2008, JCAP 0807:013 [astro-ph/0806.2911]

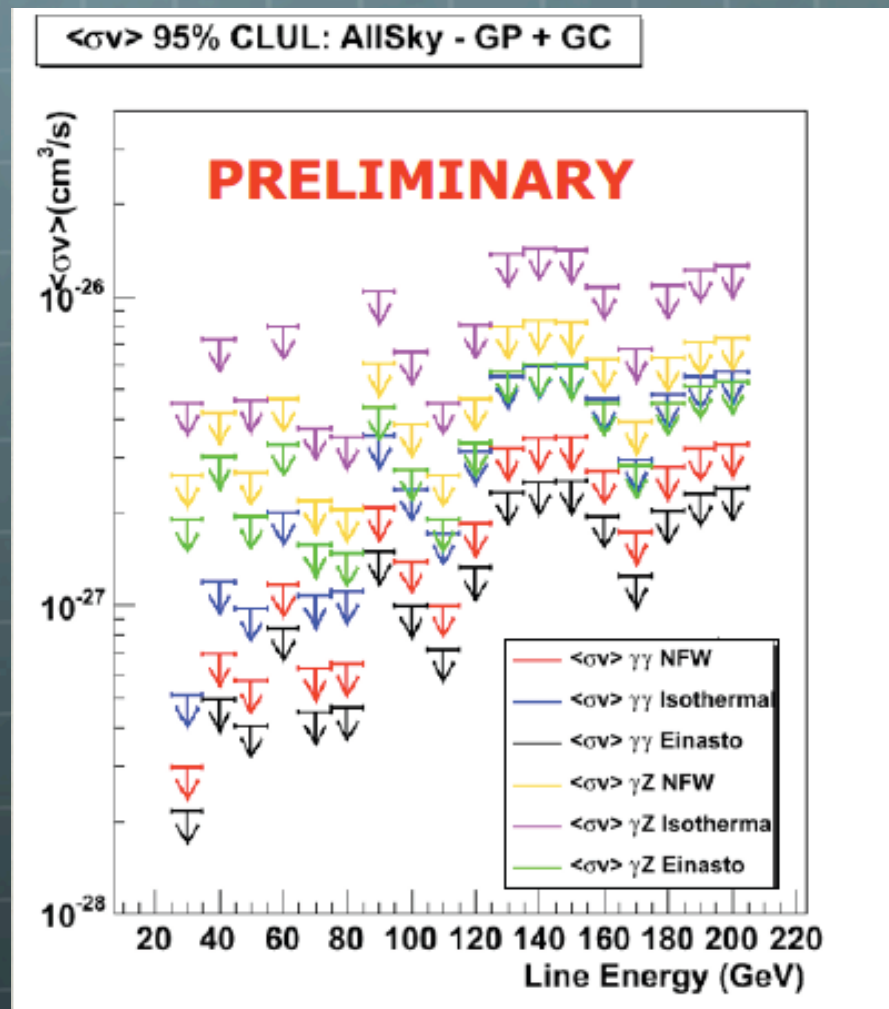
Slide from S.Murgia (Fermi symposium)

FERMI Dwarf 探索



矮小銀河のDM
量は観測から制
限。

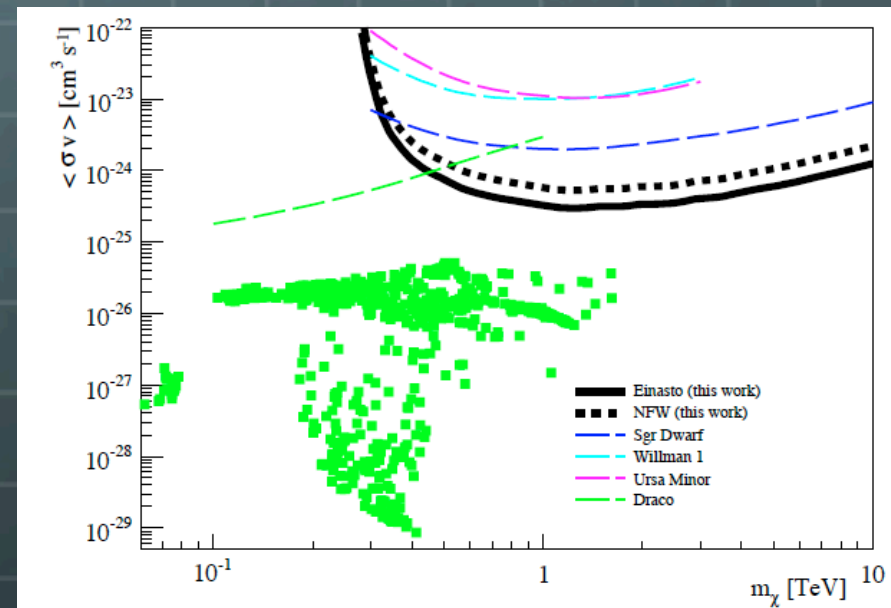
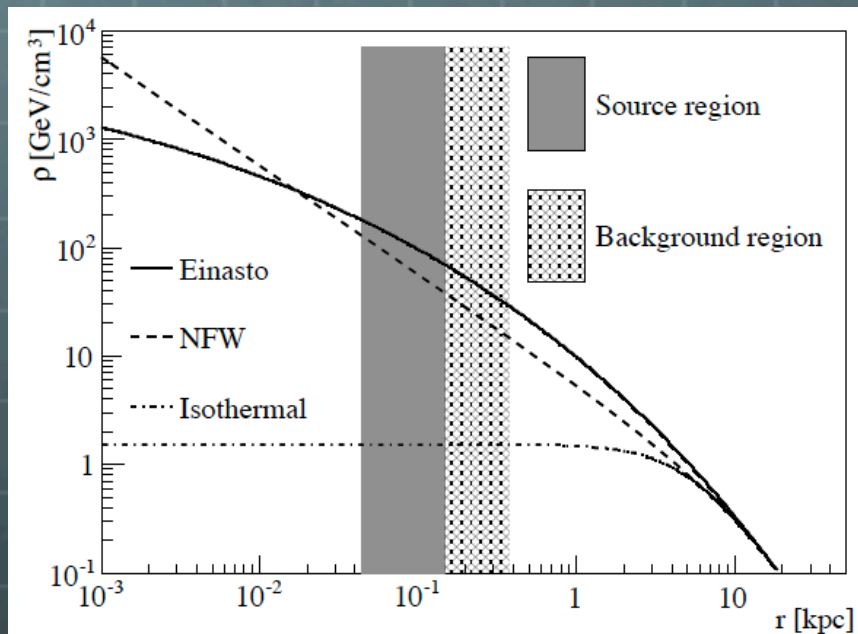
FERMI 線ガンマ線 探索



- 典型的な断面積は $\sim 10^{-30} \text{ cm}^3/\text{sec}$ 。
- Wino-likeのニュートラリーノは $5 \times 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{sec}$ に達し、制限を受けている。

HESS GC 探索

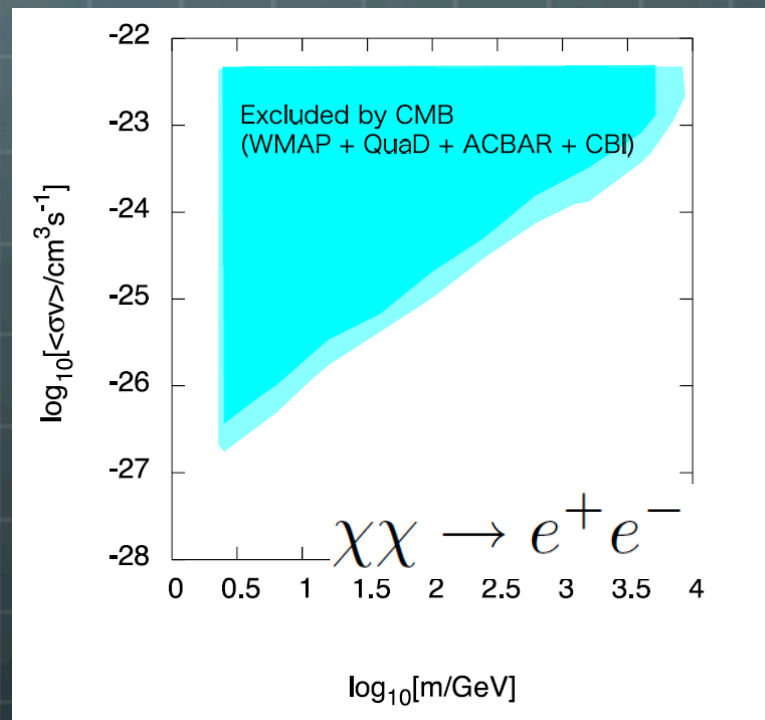
銀河中心からの厳しいガンマ線から制限



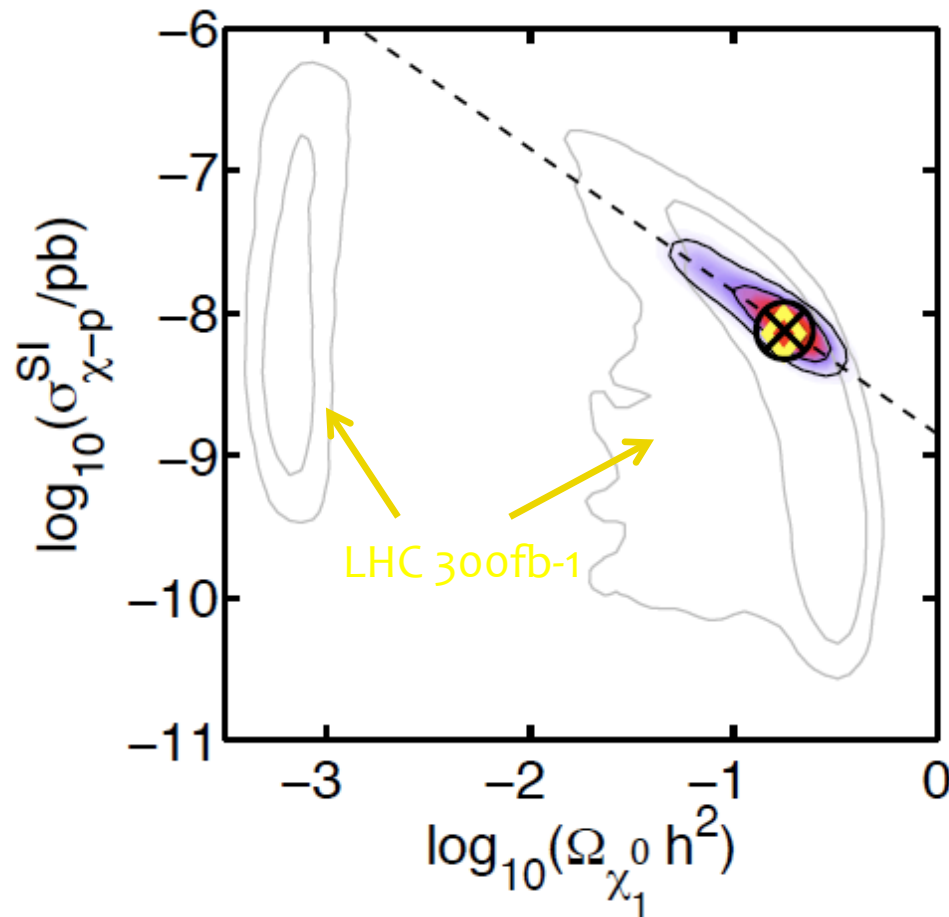
(Abramowski et al, 1103.3266)

WIMP探索 (CMB)

- 宇宙の晴れ上がり以降のWIMPの対消滅過程による γ 線、電子は、CMBに影響を与える。



Summary



G.Bertone,
Arxiv.1011.3532

🌐 それぞれの実験に、得意不得意がある。合わせ技が必要。

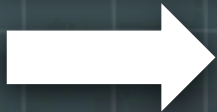
DM local densityの決定

- 🌐 Catena and Ullio (09): 7/8パラメータの天の川銀河のモデルを定義し、フィットを行う。

$$\Sigma_d, \rho_{bb}(0), R_d, R_0, M_{\text{vir}}, c_{\text{vir}}, \beta$$

DM質量分布はN-bodies inspiredのモデル。

$$f_E = \exp \left[-\frac{2}{\alpha_E} (x^{\alpha_E} - 1) \right]$$



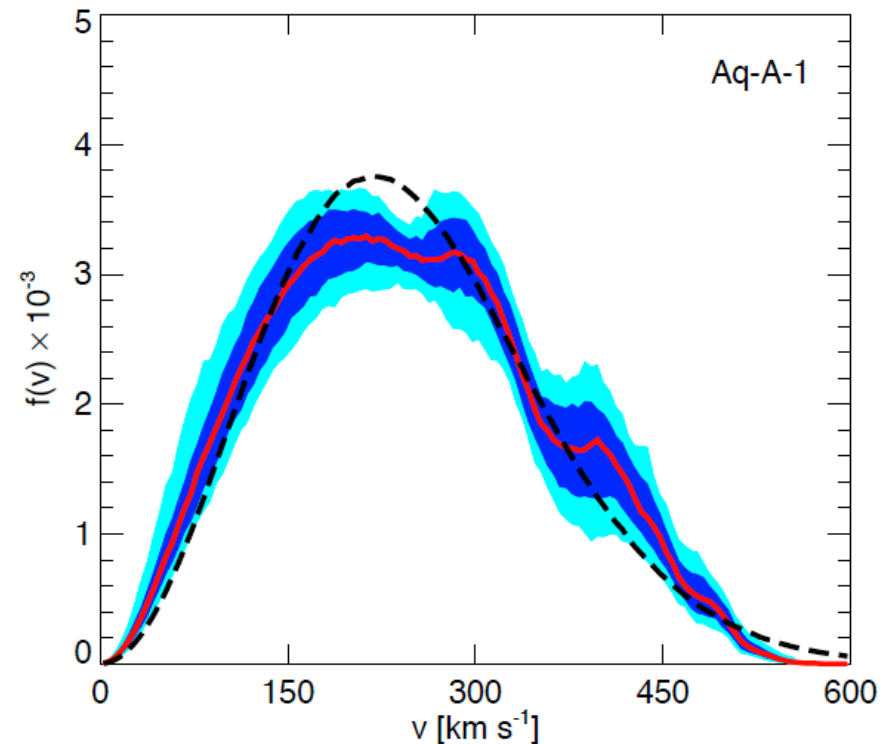
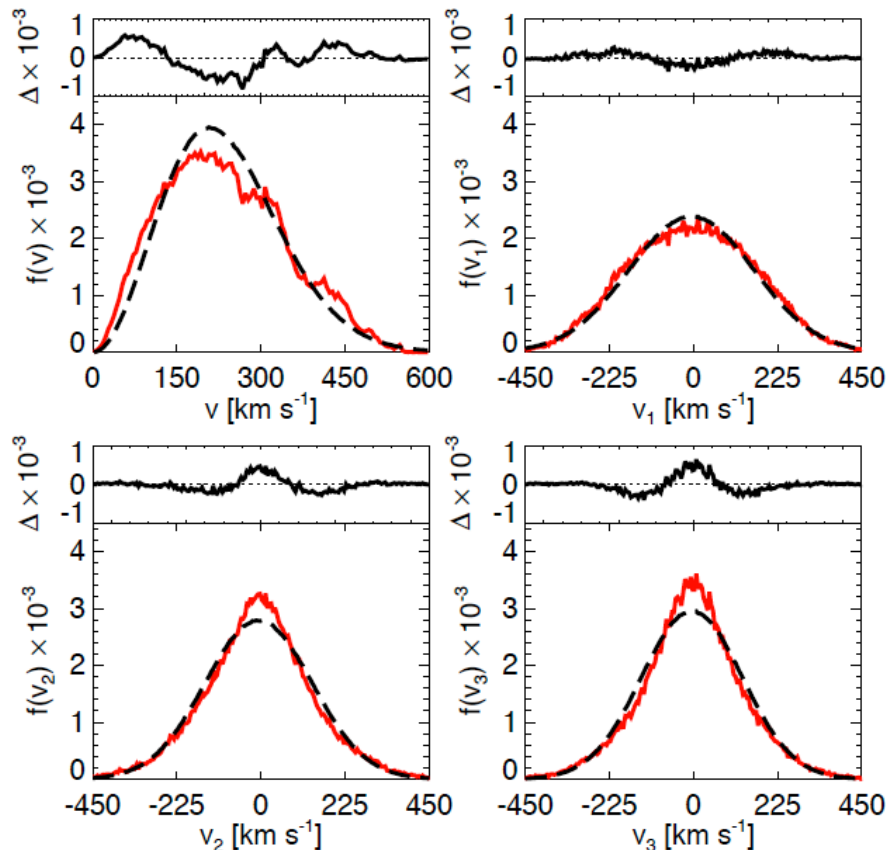
$$f_{\text{NFW}} = \frac{1}{x(1+x)^2}$$

$$\rho_{\text{DM}}(R_0) = 0.385 \pm 0.027 \\ \text{GeV/cm}^3 \text{ (Einasto)}$$

$$\rho_{\text{DM}}(R_0) = 0.389 \pm 0.025 \\ \text{GeV/cm}^3 \text{ (NFW)}$$

DM 速度分布の決定

Aquarium project (High-Res. N-bodies simulation)

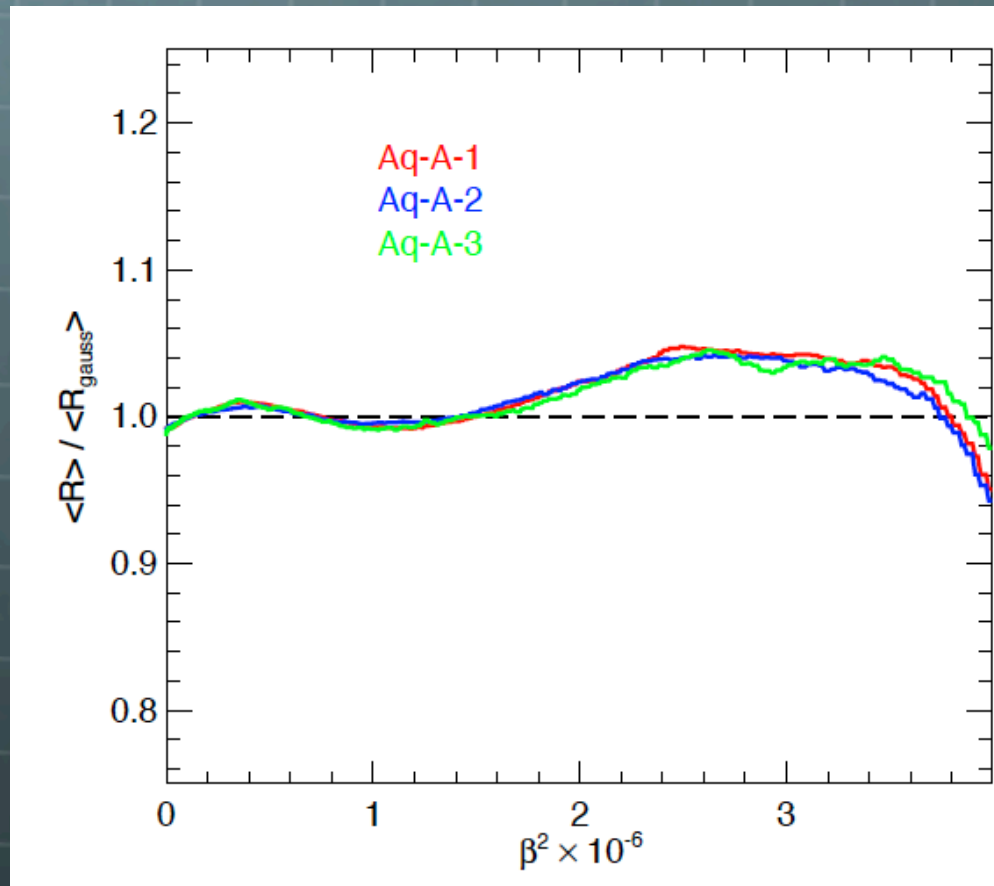


(Vogelsberger et al, 08)

Velocity distribution in 2kpc box₄₅ at R_0 .

DM 速度分布の決定

Aquarium project (High-Res. N-bodies simulation)



Gaussianとシミュレーションとの反跳エネルギーの比

太陽、地球中心からの ニュートリノ

- 太陽、地球中心に蓄積されたWIMPの対消滅からくるニュートリノ。

- 太陽、地球中心のWIMPの数密度(N)と対消滅事象数(Γ_A)。

$$\dot{N} = C - AN^2 \quad (\text{第1項は捕獲数、第二項は対消滅事象数})$$

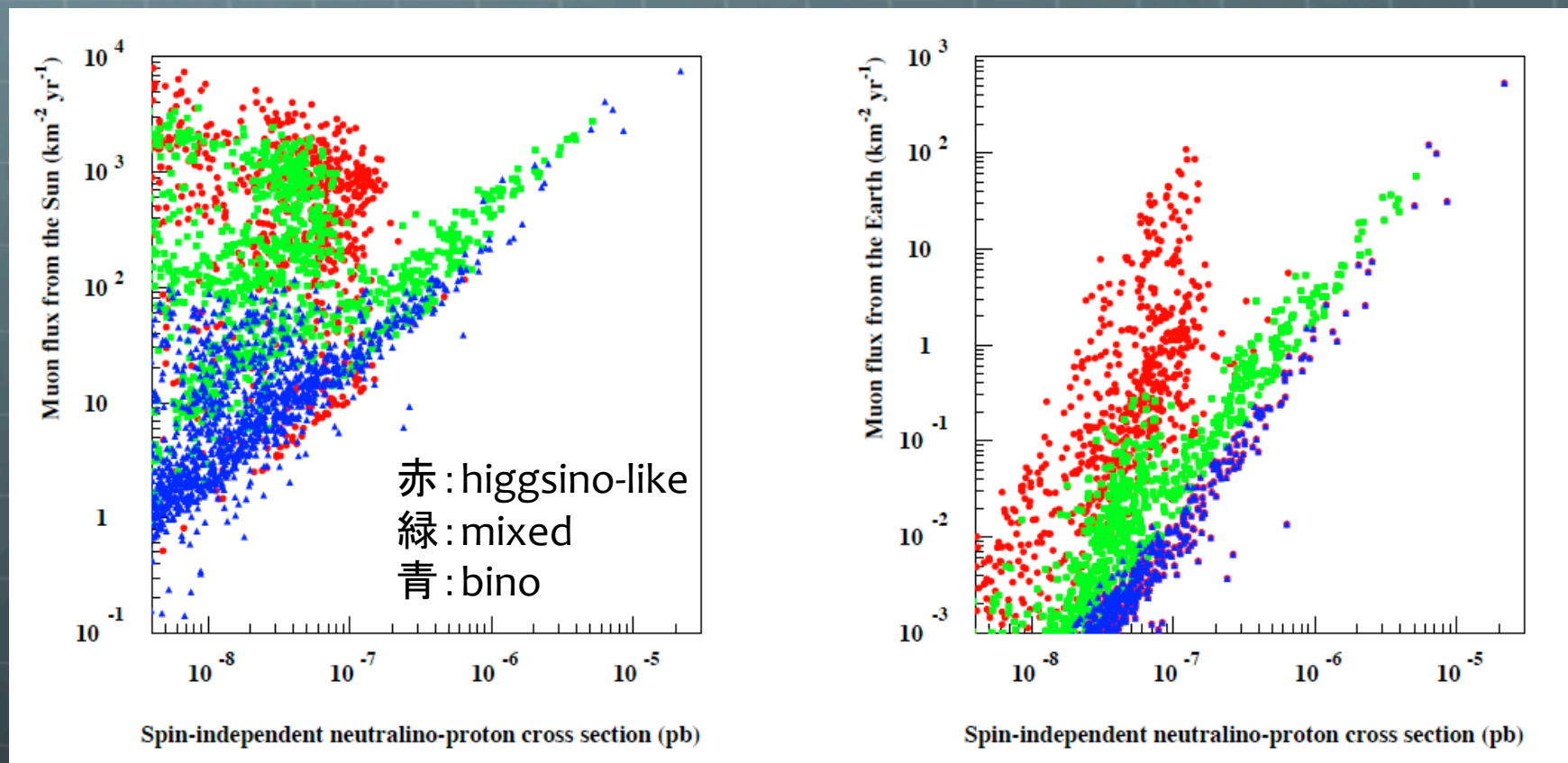
$$\Gamma_A = 1/2 AN^2 = (C/2) \tanh^2(\sqrt{CA} t)$$

$$\rightarrow (C/2) \quad (\sqrt{CA} t \gg 1)$$

太陽は平衡状態、地球中心は平衡状態に届かない。

- 太陽の場合 C はSD相互作用、地球はSI相互作用による散乱断面積と相関。

太陽、地球中心からの ニュートリノ



(Bergstrom, 2000)