

宇宙線・ γ 線観測によるダークマター探索 過去、現在、未来

2013年12月16日
京都産業大学益川塾セミナー
釜江常好

Prof. Emeritus: Stanford U (SLAC/KIPAC) and U of Tokyo (Physics Dept)

Acknowledgments: Slides borrowed from B. Cabrera, E. Charles, J. Conrad, A. Drlica-Wagner, S. Funk, T. Jeltema, T. Mizuno, T. Tait, ADMX group,
Presentations in Cosmic Frontier Workshop (March 2013 at SLAC)
Presentations in Snow Mass 2013
Presentations in P5 (December 2013 at SLAC)

要旨

宇宙全体、銀河団、銀河など、大きな天体の観測事実や、それらの進化を説明するには、

「暗くて重い粒子」(DM)が必要不可欠のように思える。

素粒子物理学では、ヒグス粒子発見で完結した「標準模型」も、説明できない現象が多く残る。

新しい重粒子と新メカニズムが必要。

「標準物質」とほとんど相互作用しない重い粒子が宇宙を満たしていると、宇宙の謎の大部分と、素粒子物理の謎の半分を解決してくれる。



奇跡のWIMP

1970-現在: 世界中で観測や実験が進むも未発見
「奇跡のWIMP」は夢であった?
まったく違う可能性も考えるべき時期が来ている?

宇宙の構成要素

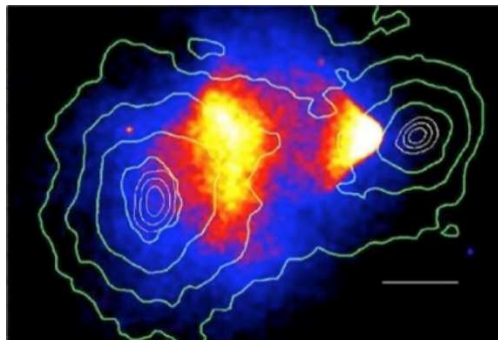
Mean Energy Density
平均エネルギー密度



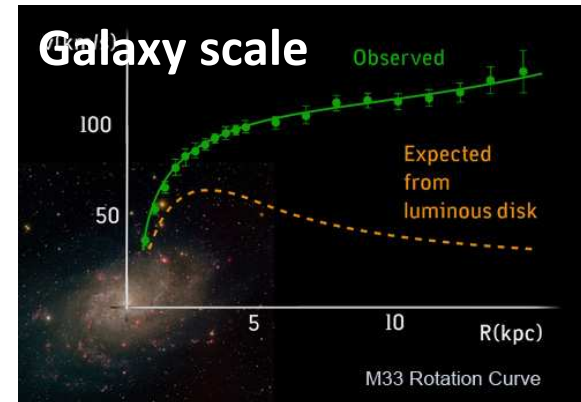
暗黒物質がある観測的証拠



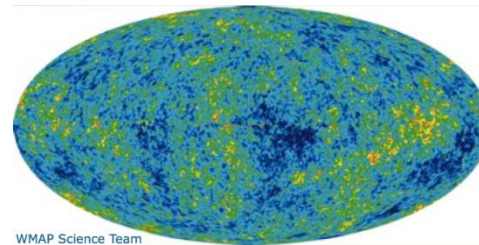
Zwicky (1937):
Missing mass on Galaxy Cluster scale
銀河団では銀河を束縛する力が不足



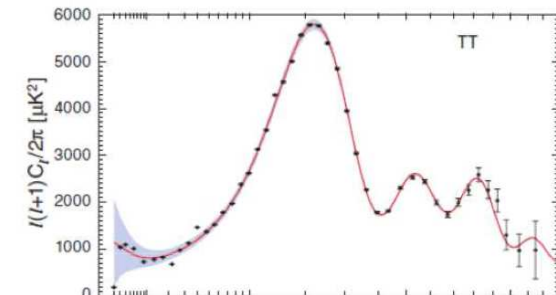
Clowe+(2006):
Collisionless DM in Bullet Cluster
DMは無衝突で銀河団を通過する。



Rubin+(1980):
Missing mass on Galaxy scale
銀河では星/星雲の回転を支える力が不足



WMAP(2010) Planck(2013):
DM imprint as CMB Acoustic Oscill at $t=0.38\text{Myr}$
CMBでは重力相互作用で音響振動(非バリオン)



暗黒物質をめぐる最近の話題

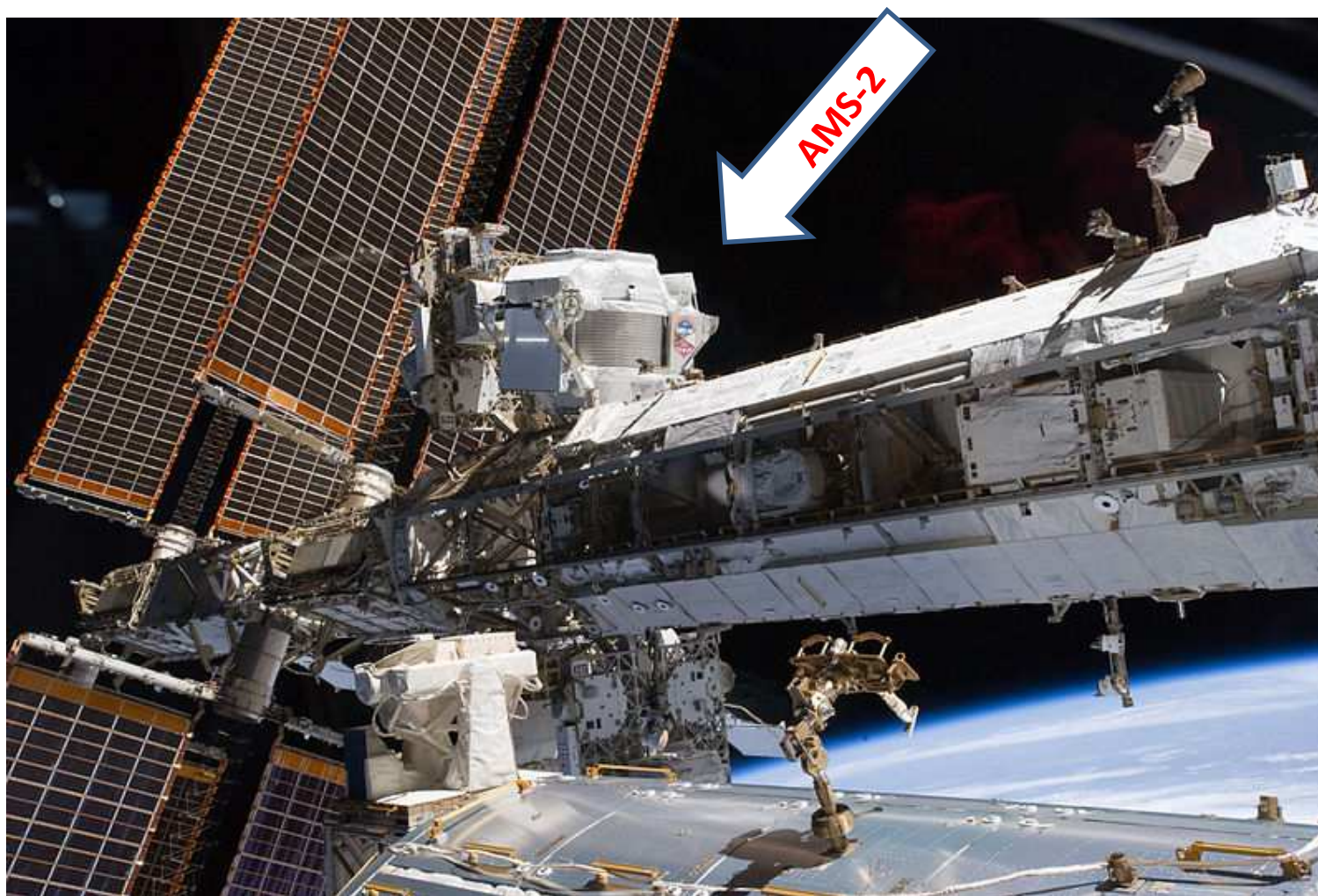
地球に来る宇宙線中の陽電子/電子比が10GeVから上昇

- 2009年:PAMELA => 暗黒物質の崩壊?
- 2012年:Fermi => PAMELAの結果を確証
- 2013年:AMS-2 => 高精度の実験結果を発表



Figure 1: From its vantage point ~260 miles (~400 km) above the Earth, the Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) collects data from primordial cosmic rays that traverse the detector.

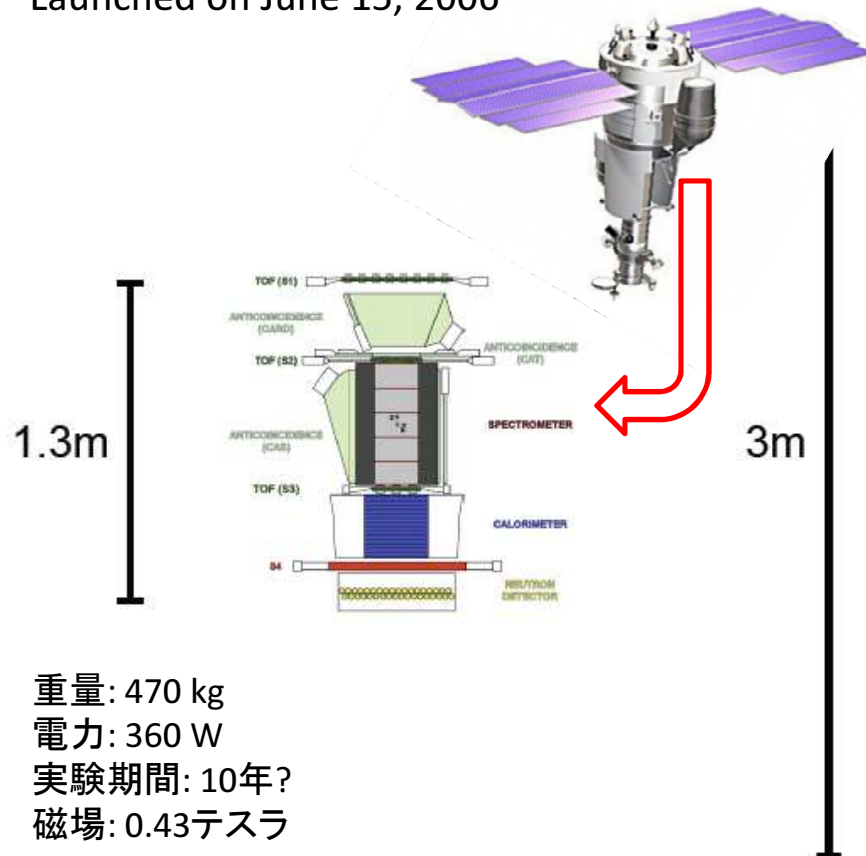
国際宇宙ステーション (ISS) に取り付けられたAMS-2



衛星による宇宙線測定実験

PAMELA

Launched on June 15, 2006



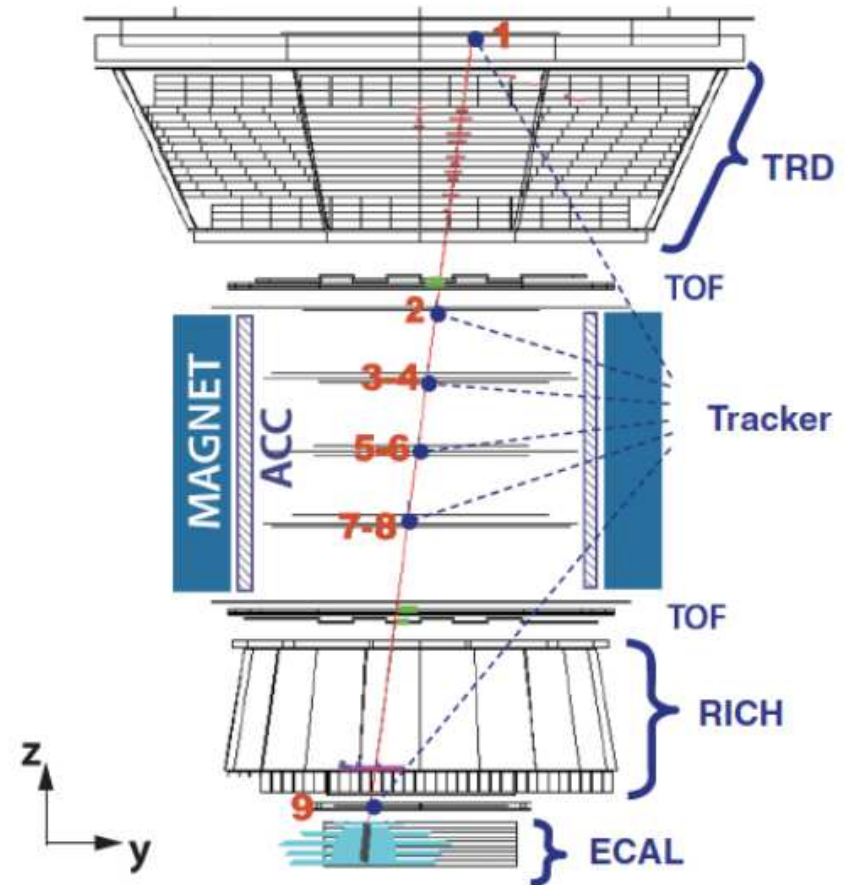
重量: 470 kg
 電力: 360 W
 実験期間: 10年?
 磁場: 0.43テスラ

Picozza et al., *Astropart. Phys.* 27, 296 (2007)
 Adriani et al., *Nature* 458 (2009)

AMS-2

Launched on May 16, 2011

重量: 8,500 kg
 電力: 2,500 W
 実験期間: 10-18 年
 磁場: 0.15 テスラ

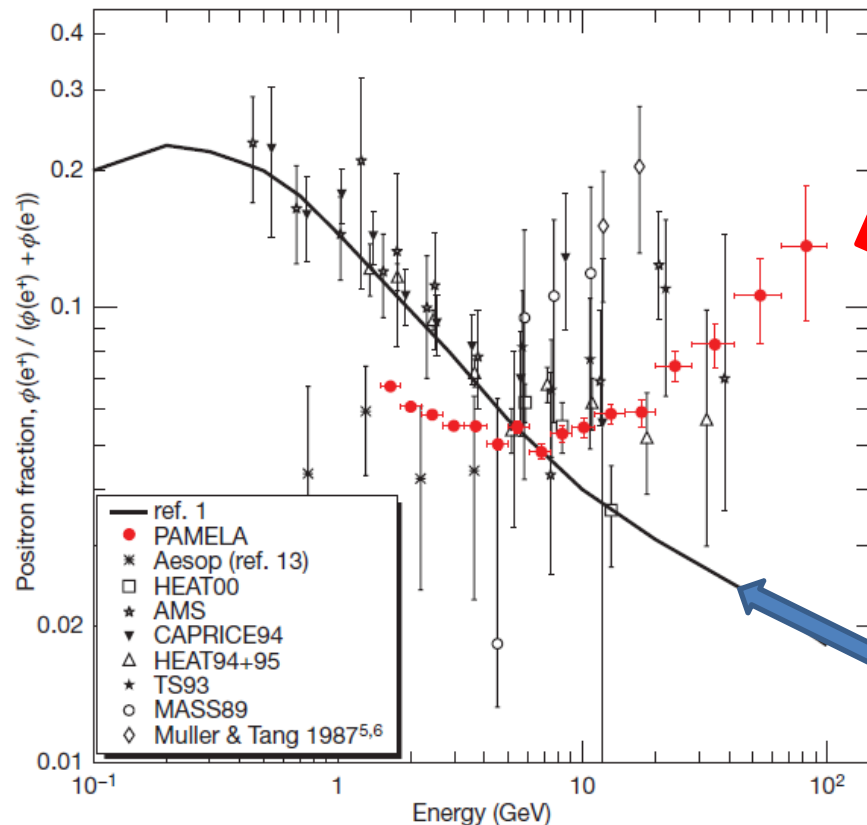


Aguilar et al., *PRL* 110, 141102 (2013)
 Kounine, et al. *Int. J. Mod. Phys. E.* 21, 08 (2012)

“Positron Abundance Anomaly” in Cosmic Ray

宇宙線の陽電子成分に「異常」

PAMELA “An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5–100 GeV” Nature Vol 458 (2 April 2009)



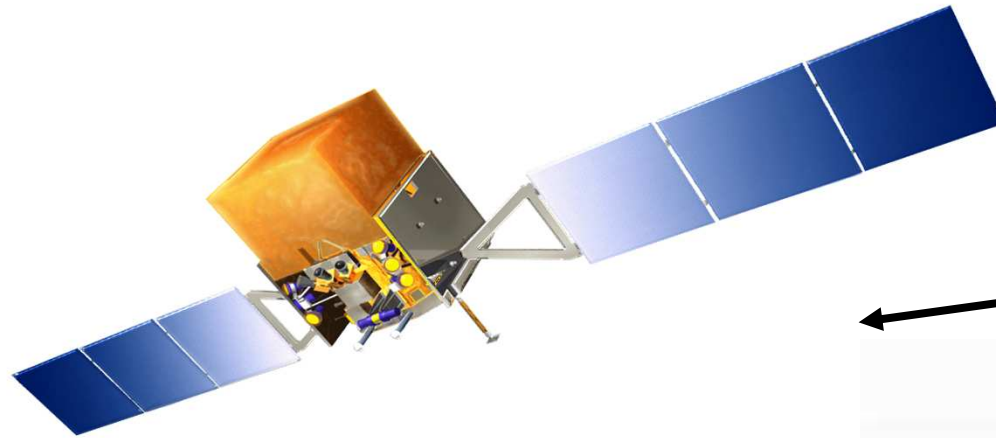
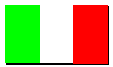
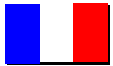
PAMELA measurements
PAMELAの測定結果

私のコメント:

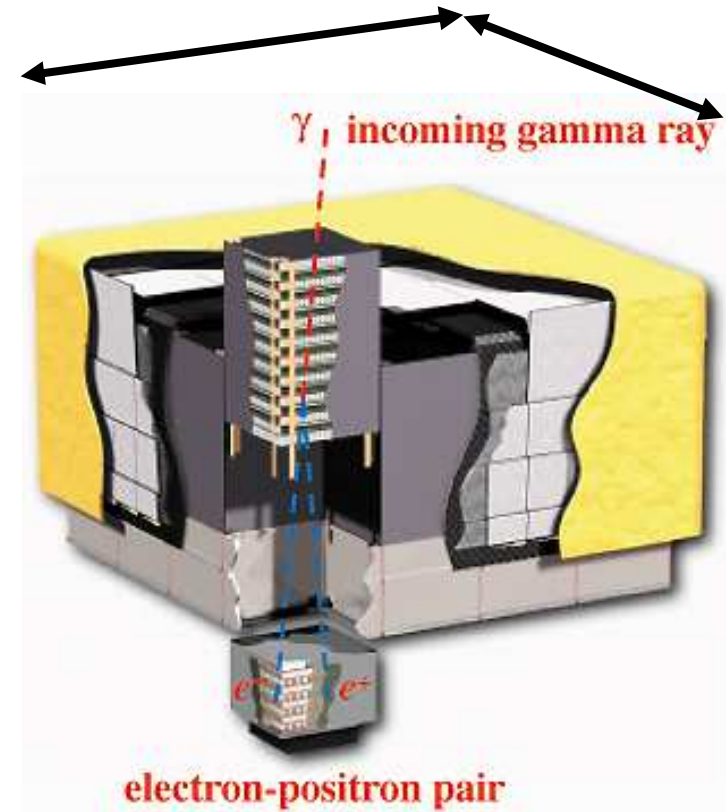
ここで使われたGALPROPモデルには、重要な陽電子源であるパルサーの寄与が含まれていなかった。

A GALPROP spectr of $e^+/(e^+ + e^-)$
比較のために参照された陽電子比

Fermi天体ガンマ線観測衛星



~2mx2m

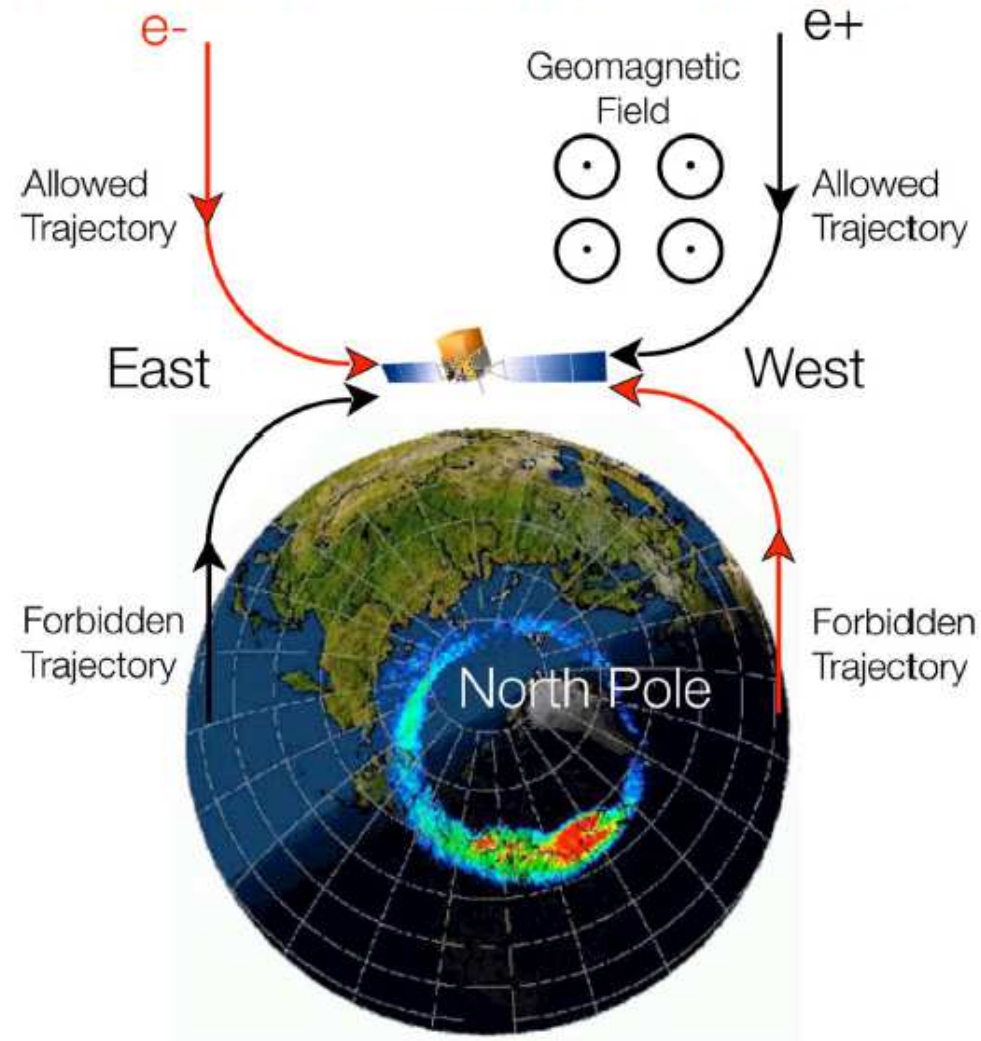


- 宇宙から飛来する**ガンマ線**の観測を主目的とする科学衛星。
- 宇宙からくる**電子**と**陽電子**も地球磁場を利用して、測定可能。
- **打ち上げ:2008年6月**
- **重量:3 ton**
- **電力:600W**
- **運用期間:10年**

Fermi without Magnet: Earth Magnetism

磁石を持たないフェルミ衛星：地球磁場を使う

Fermi LAT Collaboration, Ackermann et al. 2011, PRL 108, 011103

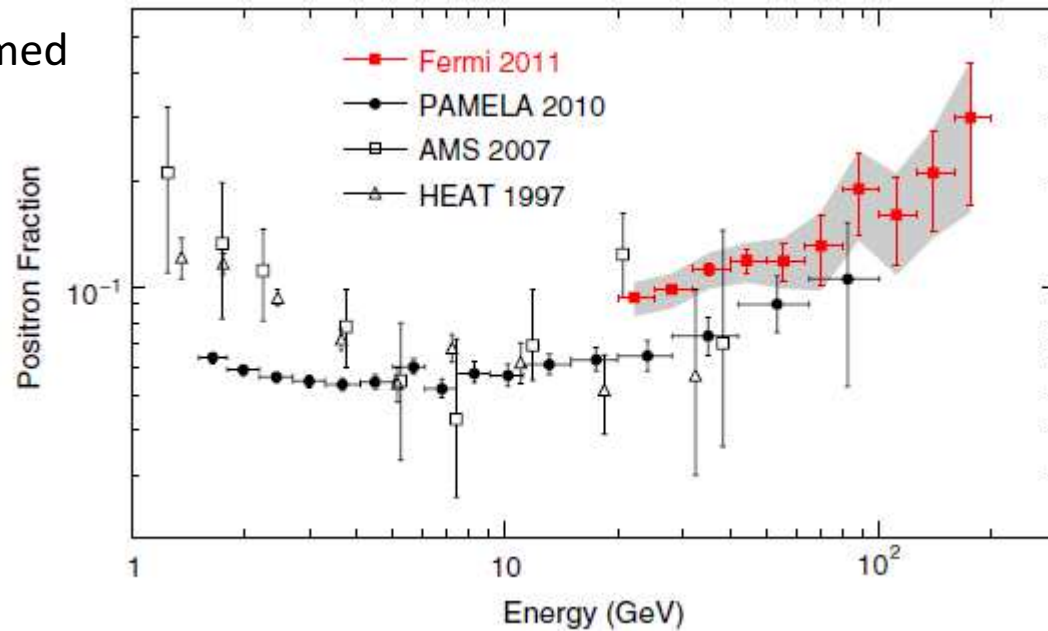


Possible Origins of “Positron Anomaly”

陽電子アノマリーの起源

PAMELA measurements confirmed
by Fermi Large Area Telescope

PRL 108, 011103 (2012)

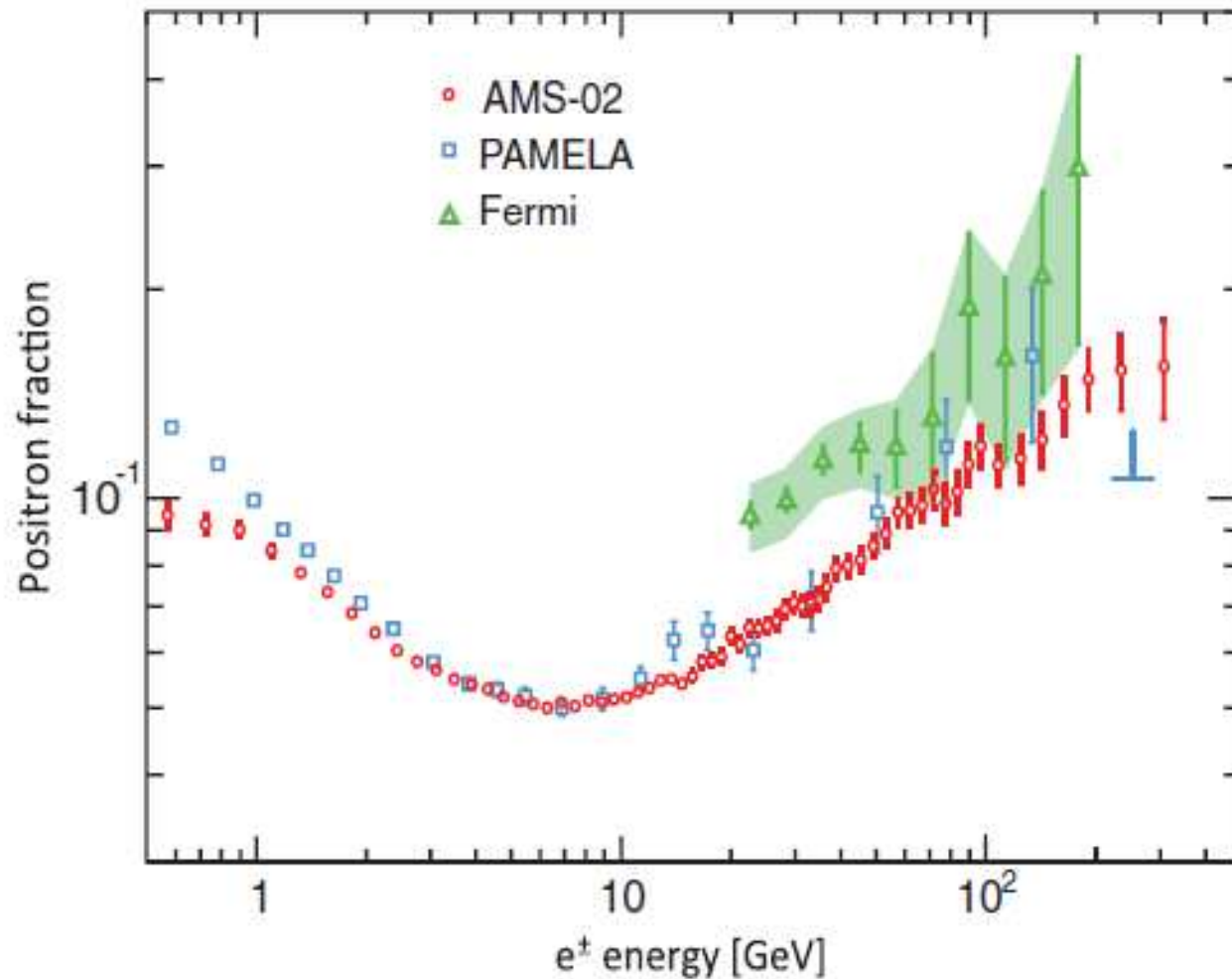


もしGALPROPの参照スペクトルが天体起源の陽電子をすべて正しく含んでいれば



何か未知の陽電子源: Dark Matter?

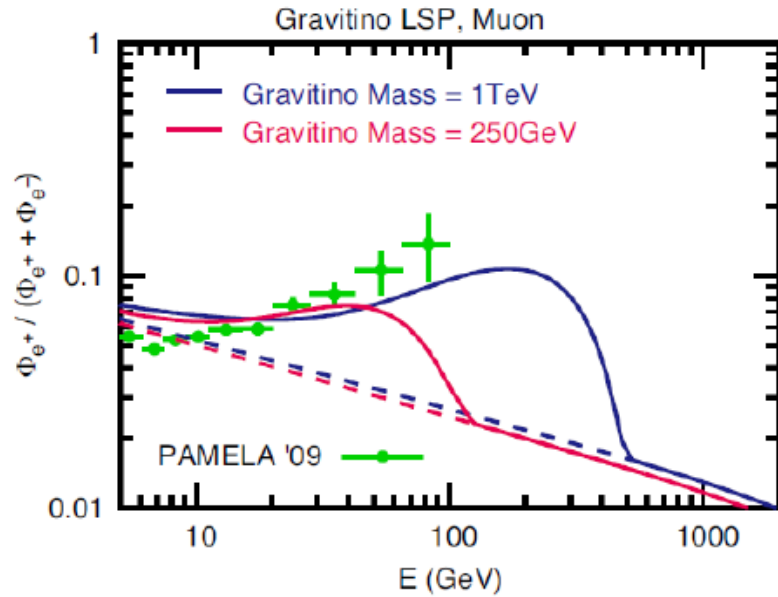
$e^+/(e^- + e^+)$ 比測定: AMS, PAMELA, Fermi



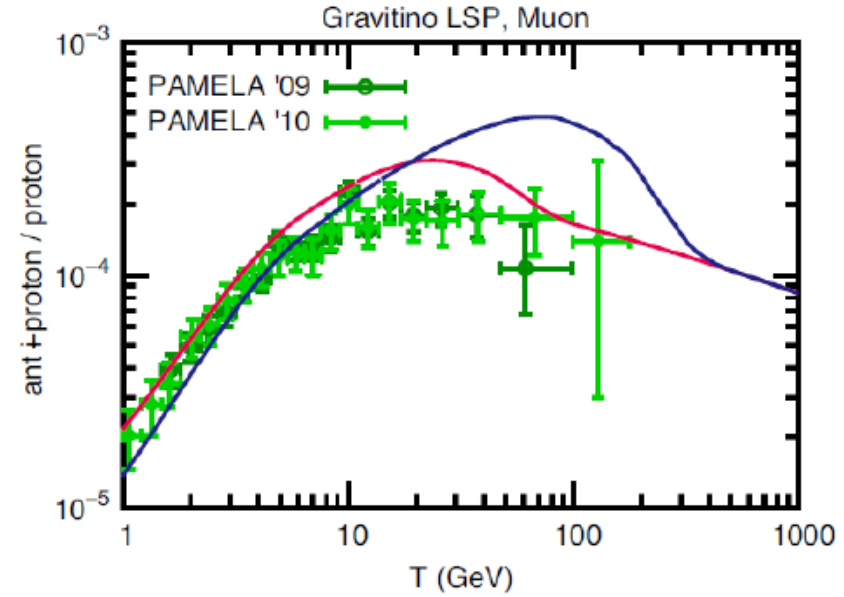
AMS-2 results

- Extends to $\sim 300\text{GeV}$
- Highest precision
- Agree with PAMELA
- 300GeVまで拡張
- 高精度
- PAMELAと合っている

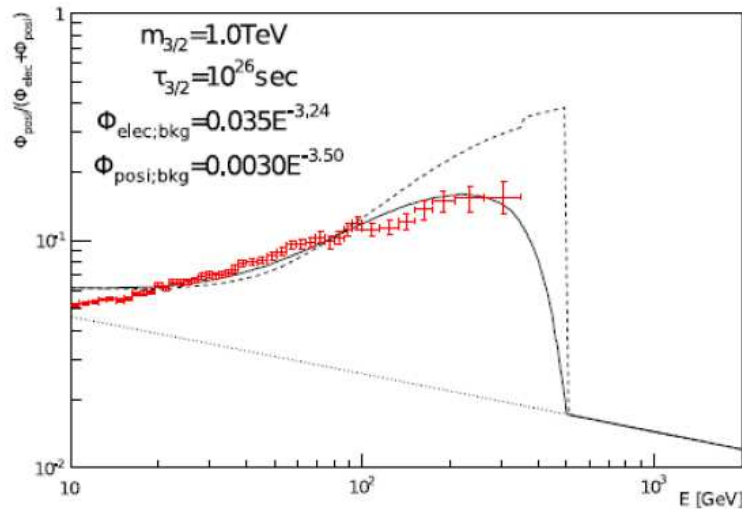
陽電子比の増加をDMで説明する理論：例2つ



Positron Fraction

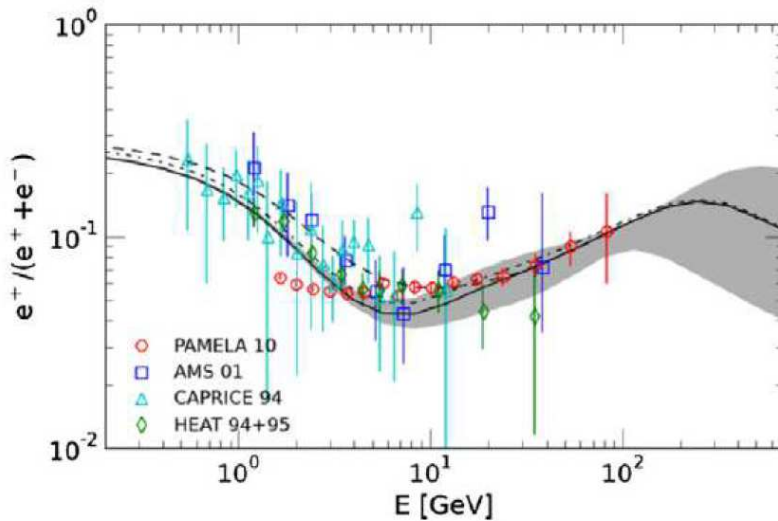


[Ishiwata, Matsumoto & TM ('10)]



Masahiro Ibe^(a,b), Sho Iwamoto^(b), Shigeki Matsumoto^(b),
Takeo Moroi^(c,b) and Norimi Yokozaki^(b)

陽電子比の増加を**パルサー**で説明する: 例2つ

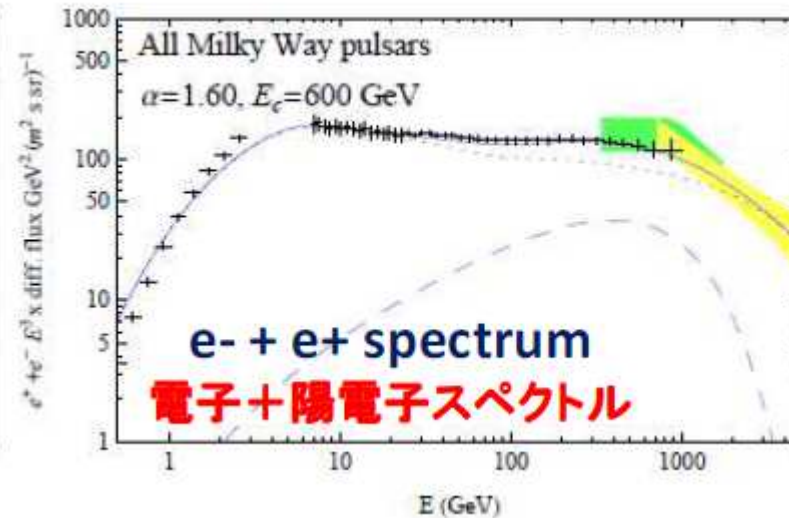
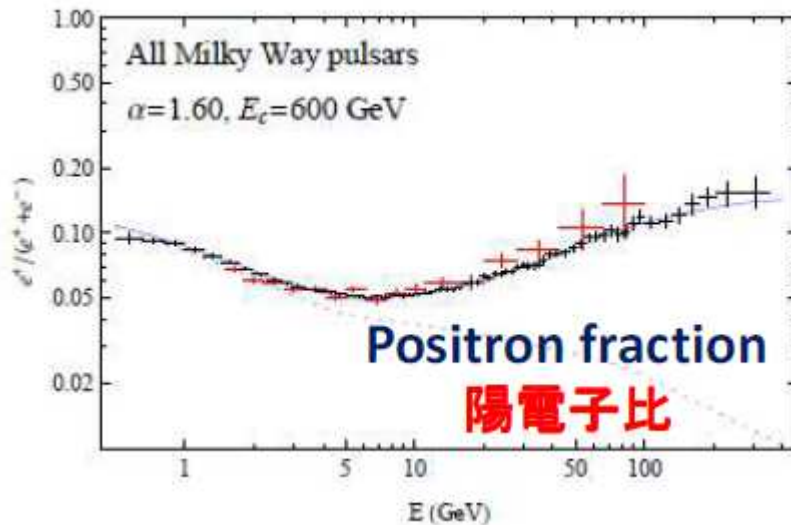


Lee, Kamae, et al. 2011

GALPROPに、最近発見されたガンマ線パルサーとパルサー星雲の進化過程を入れると、自然に説明される。

「不都合な真実」と見なされ、Ting教授の記者発表でも無視される

Cholis & Hooper 2013



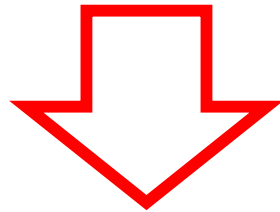
暗黒物質、暗黒粒子を、**広い視野で見直し**、
実験や理論を概観してみる

この講演で、私が強調したいことです

素粒子理論とダークマター

相互作用が極めて弱く重い新粒子(WIMP)が破綻を救う

- 標準模型は数100GeVを超えるあたりで、破綻する。=> 新しい理論?
- 超対称性理論(SUSY)は、その救世主で、WIMPの存在を预言する
- 宇宙論では、DMの密度と速度の積、 $\langle\sigma v\rangle$ が $3 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ であった初期に通常物質から「分離」していたら、都合が良い。=>DMの質量は100GeVあたり



素粒子と宇宙物理をつなぐ基礎理論の大勝利？

素粒子ダークマターの候補

良く議論されるダークマター粒子の候補

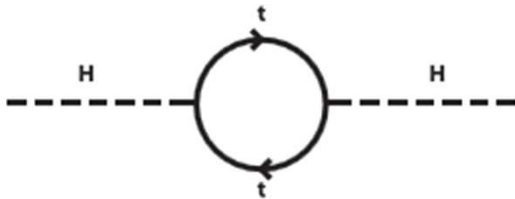
- Super Symmetry (SUSY) particle(s) 超対称性理論で予想
- Gravitino (mod SUSY) グラヴィティーノ(超対称性を修正)
- Non-SUSY particles 超対称性でない理論から予想
- ✓ Kaluza-Klein particles カルーザ・クライン理論
- ✓ Axion アクシオン

LHCで、SUSYが発見されず、ヒグス粒子の質量が低いことが判った、いま

あらゆる可能性を再検討し直す時期
複数のダークマターが併存している可能性も十分ある

SUSY(超対称性)とは

- 1966年 ハドロンの対称性として、宮沢弘成が提唱。大きく破れていたなので、忘れ去られる
1971年 4次元空間の対称性として、崎田を含む数名が提唱
1974年 Wess-Zuminoが素粒子理論に、具体的に応用=>現在のSUSYの始まり
1981年 GeorgiとDimopoulosが、最小SUSYスタンダード模型(MSSM)として形式化



ダイアグラムに現れる「ループ」が、振幅計算で無限大へ発散させる。



スピン半整数の粒子に、未発見の整数の粒子が存在すると、発散を消してくれる。

- $(0, 1/2)$ カイラル・ペア (クォークやレプトン)
- $(1/2, 1)$ ベクトル・ペア (光子やWやZ)
- $(1, 3/2)$ グラビティノ・ペア
- $(3/2, 2)$ グラビトン・ペア

MSSMの現象論：pMSSM

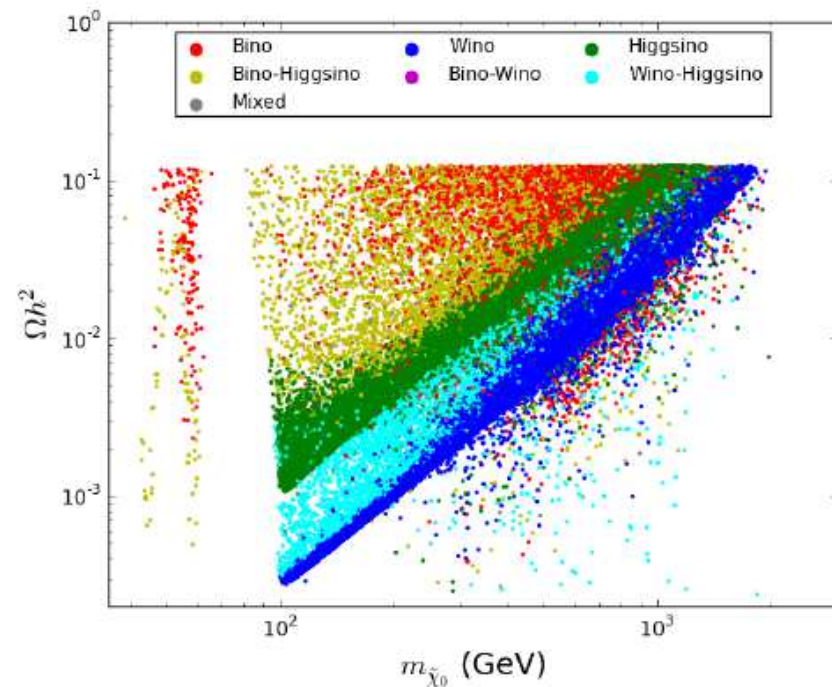
- 標準素粒子理論
- 小林・益川のクォーク混合、
- **WMAP/Planckに合う「Relic密度」を取り入れる**
- **上の範囲内で、20のパラメーターで可能な範囲をカバー**
- SLACを中心として、新しい実験結果を取り込み**更新されている**

問題点：

- ◆ 本当に可能な全てのMSSMをカバーできるのか？
- ◆ 20個のパラメーターは多すぎる
- ◆ プレゼンテーションでは、2つのパラメーターを選んで表示せざるを得ない

対処法：

- ✓ ランダムに1万-10万程度のパラメーター組み合わせを作り、点で示す



MSSMだけではない: Tim Tait他のまとめ



暗黒物質に関して何が判っているのか

「必要不可欠であること」と「重力と相互作用すること」以外は、そんなに詳しく判っていない。

今までは、WIMPの奇跡、によりバイアスを受けていた。

質量は？

スピンは？

安定なのか？

どの粒子と、どの程度の強さで相互作用するのか？

重力

弱い相互作用

ヒグス粒子

クォークやグルオン

レプトン

残留している密度は？

暗黒バリオンとの比

宇宙の進化の中で果たした役目

CMBの構造

大規模な構造の形成

素粒子ダークマター候補：検出方法

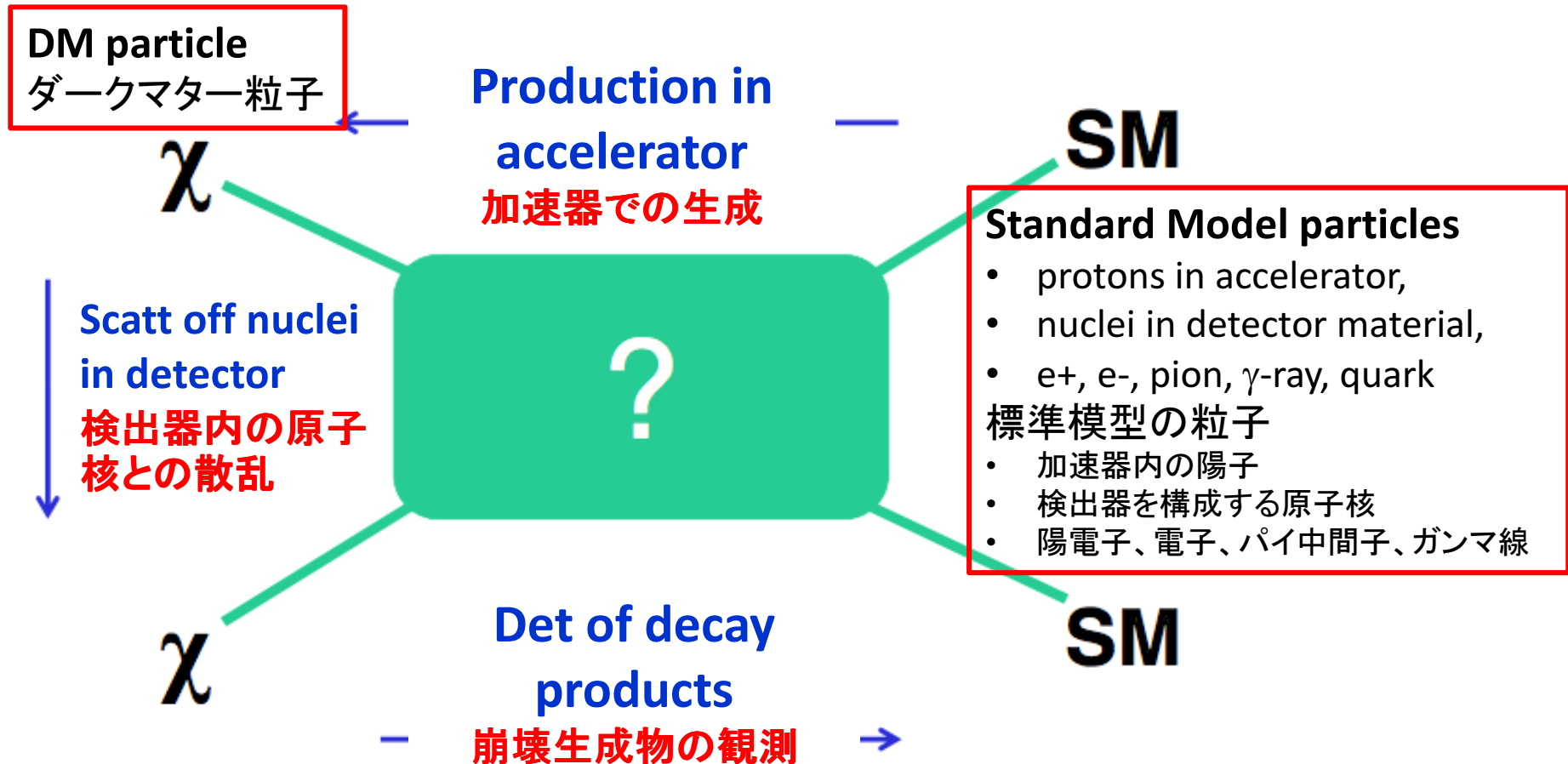
	Mass 質量	Cold/Warm DMの温度	Detectability 検出可能性			
			LHC 加速器	Early Universe CMB実験など	Direct 直接探索	Indirect 間接探索
SUSY	TeV	Cold	O	X	O	O
Gravitino	keV	Cold/Warm	O	X	X	X
Kaluza-Klein	TeV	Cold	O	X	O	O
Axion	μeV	Cold	X	X	Δ	Δ

ダークマター粒子のHot、Warm、Coldの定義

- **Hot(熱い)**: 光速の近い速度で飛び交う=軽い粒子 (**軽いニュートリノ**)
- **Warm(温かい)**: 光速より数桁遅いが数1000km/sで飛び交うが粒子
- **Cold(冷たい)**: 数100km/sの速度で飛び交う粒子 (**WIMP**)

直接探索と間接探索

Particle physics: Either produce (LHC), sense directly, or detect their decay products
素粒子物理学: 生成するか(LHC)、直接触れるか、崩壊生成物を観測する

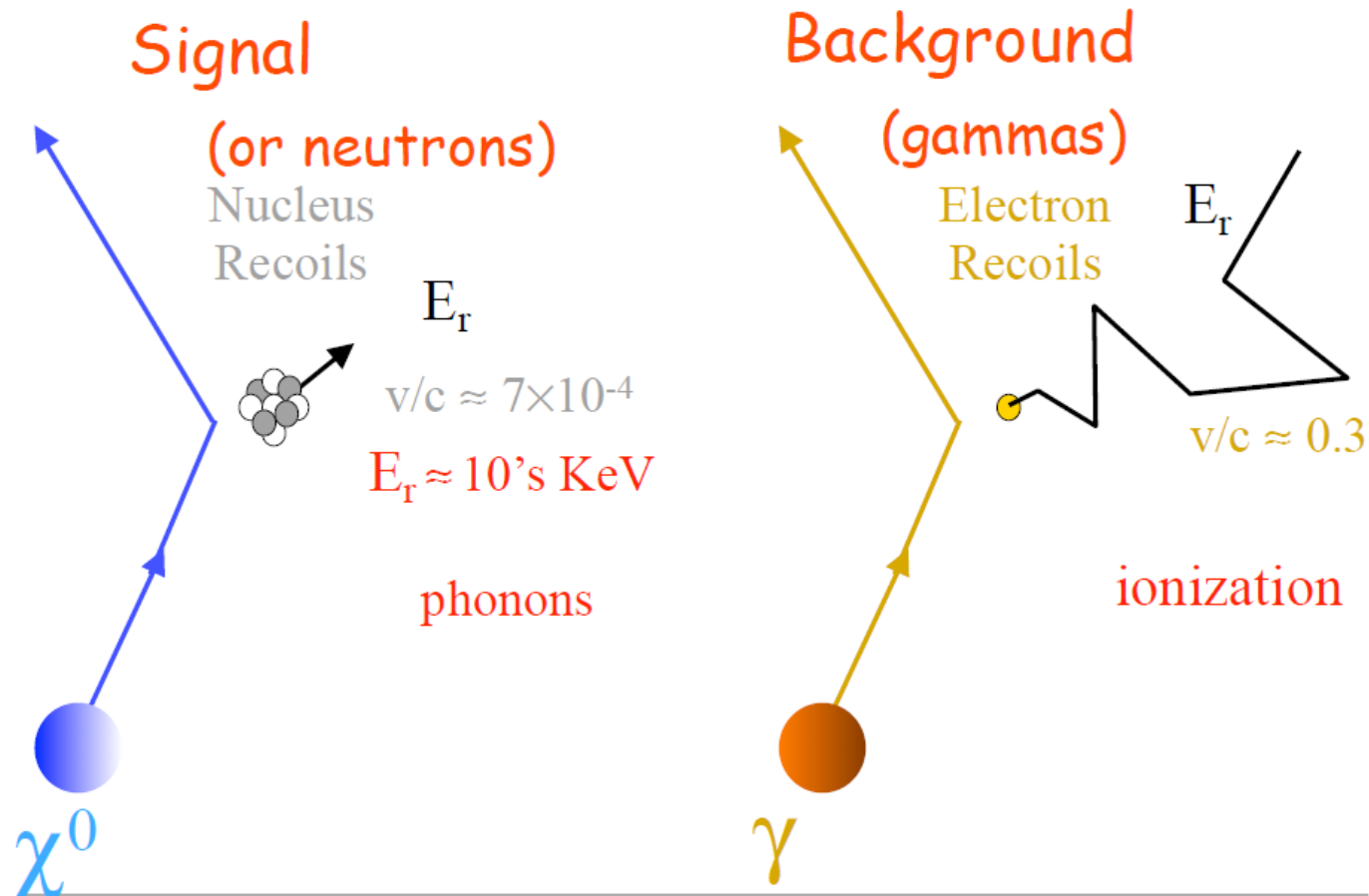


直接探索実験

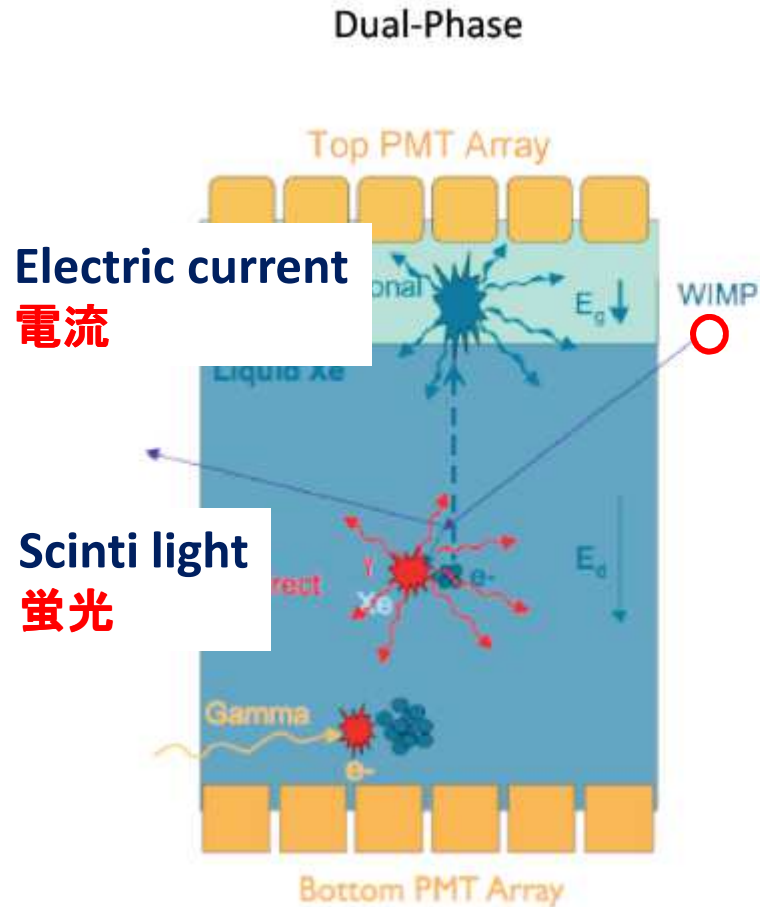
ダークマターの直接探索

Detect the weak signals (ionization, phonon) emitted by nuclei kicked by DM

ダークマターによって蹴られた原子核が出す微弱信号(電離、フォノン)を検出



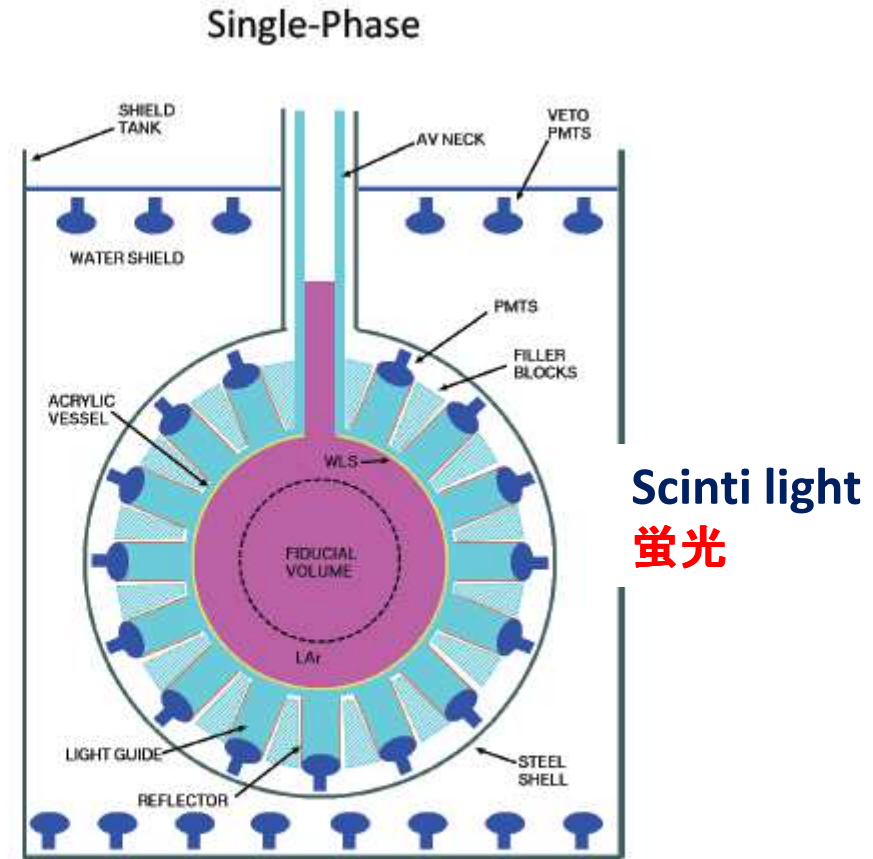
液体キセノンを使ったDM直接検出器



Electric current
電流

Scinti light
蛍光

Courtesy E. Aprile



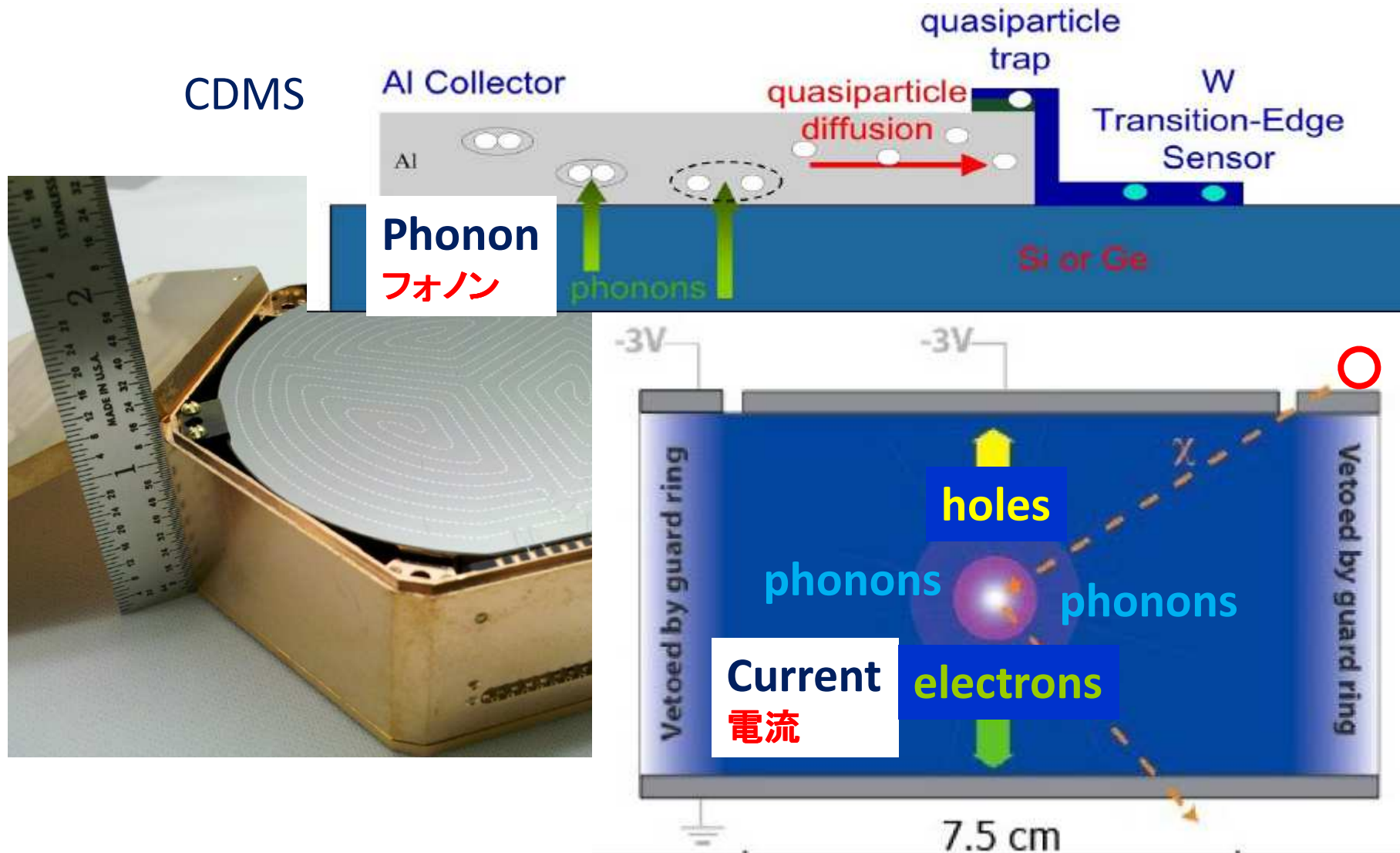
D. N. McKinsey and J. M. Doyle, *J. Low Temp. Phys.* 118, 153 (2000).

D. N. McKinsey and K. J. Coakley, *Astropart. Phys.* 22, 355 (2005).

M. Boulay, J. Lidgard, and A. Hime, *nucl-ex/0410025*.

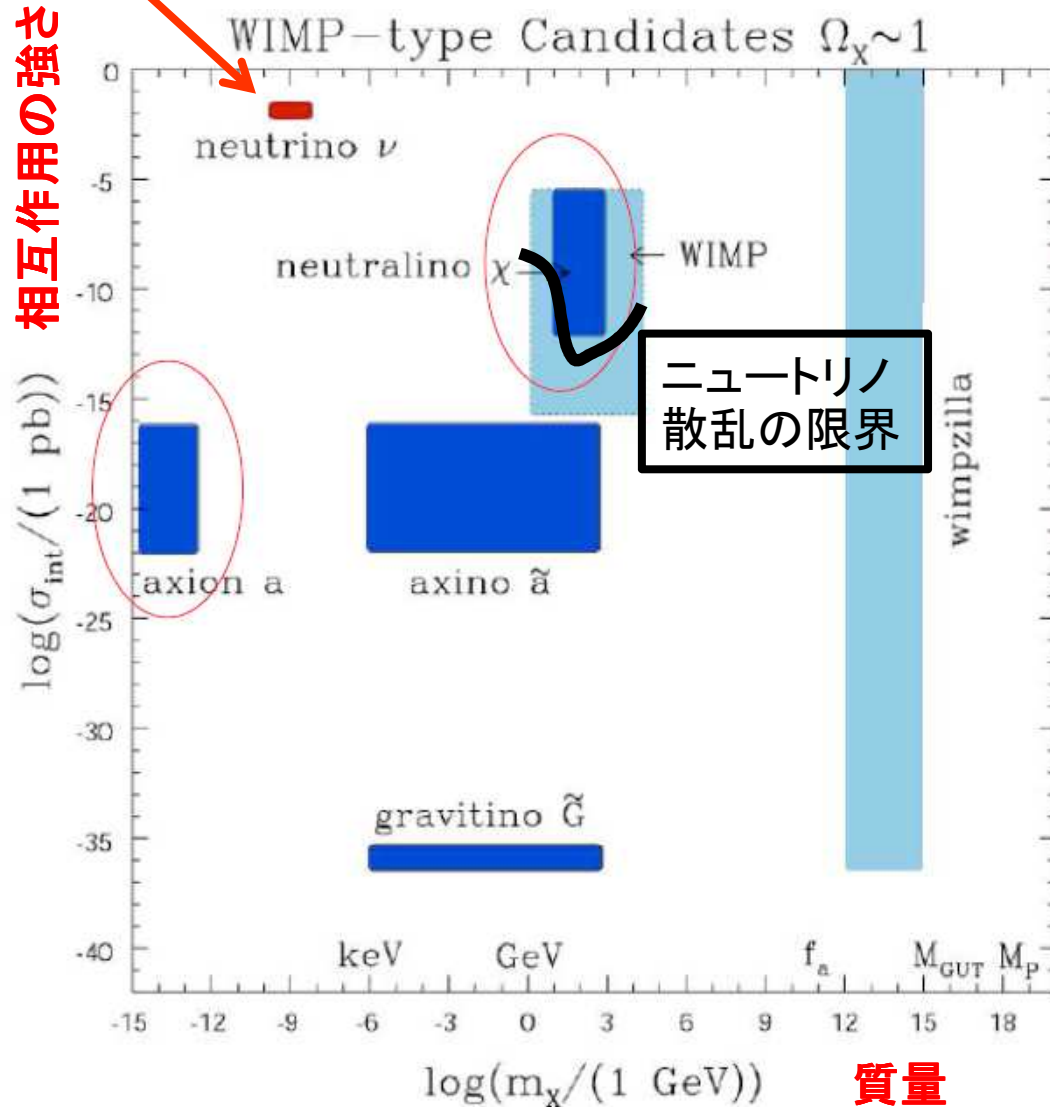
M. Boulay and A. Hime, *Astropart. Phys.* 25, 179 (2006).

半導体検出器によるダークマターの直接検出



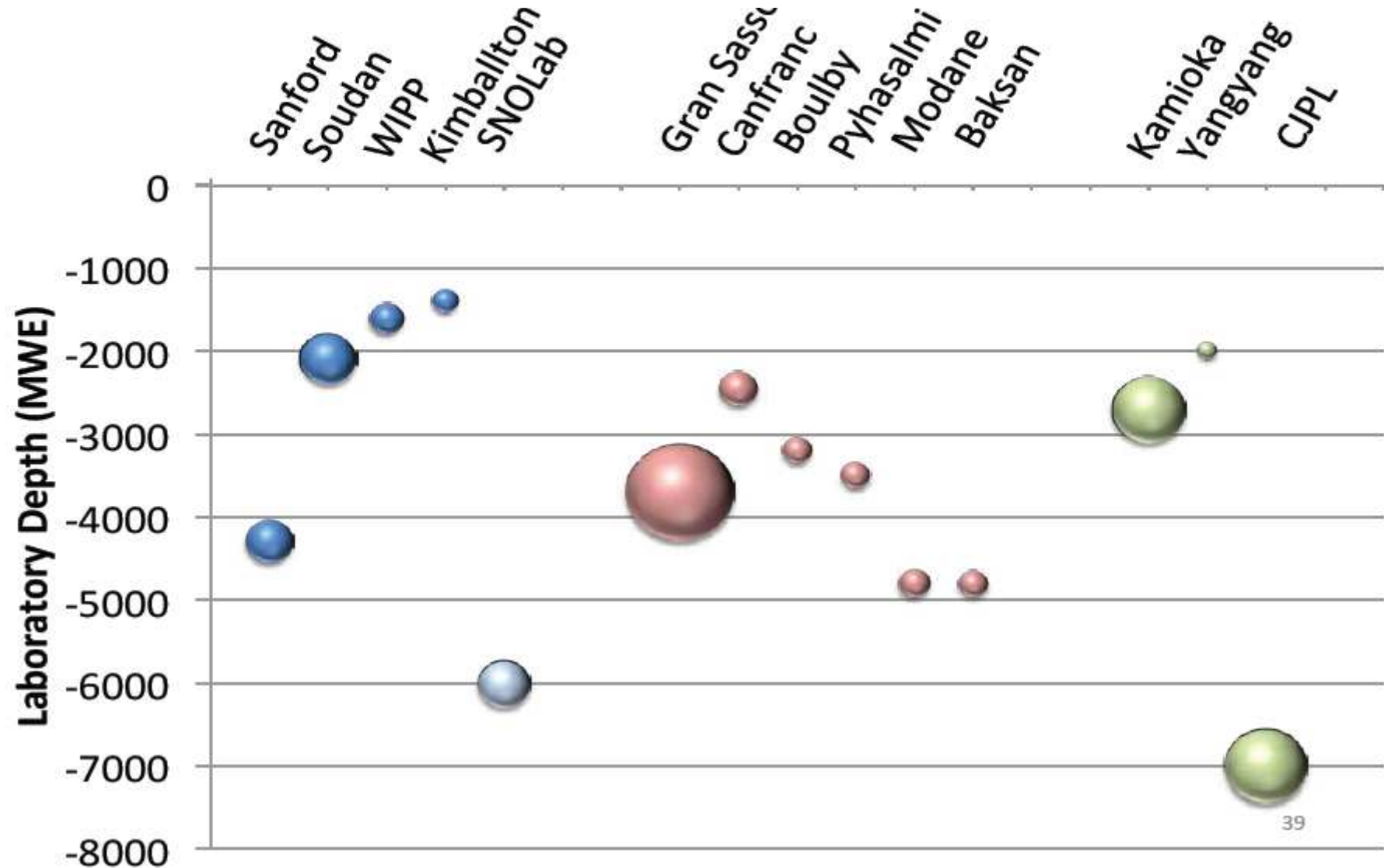
WIMPダークマターの候補

ニュートリノ実験、
X線観測等の制限

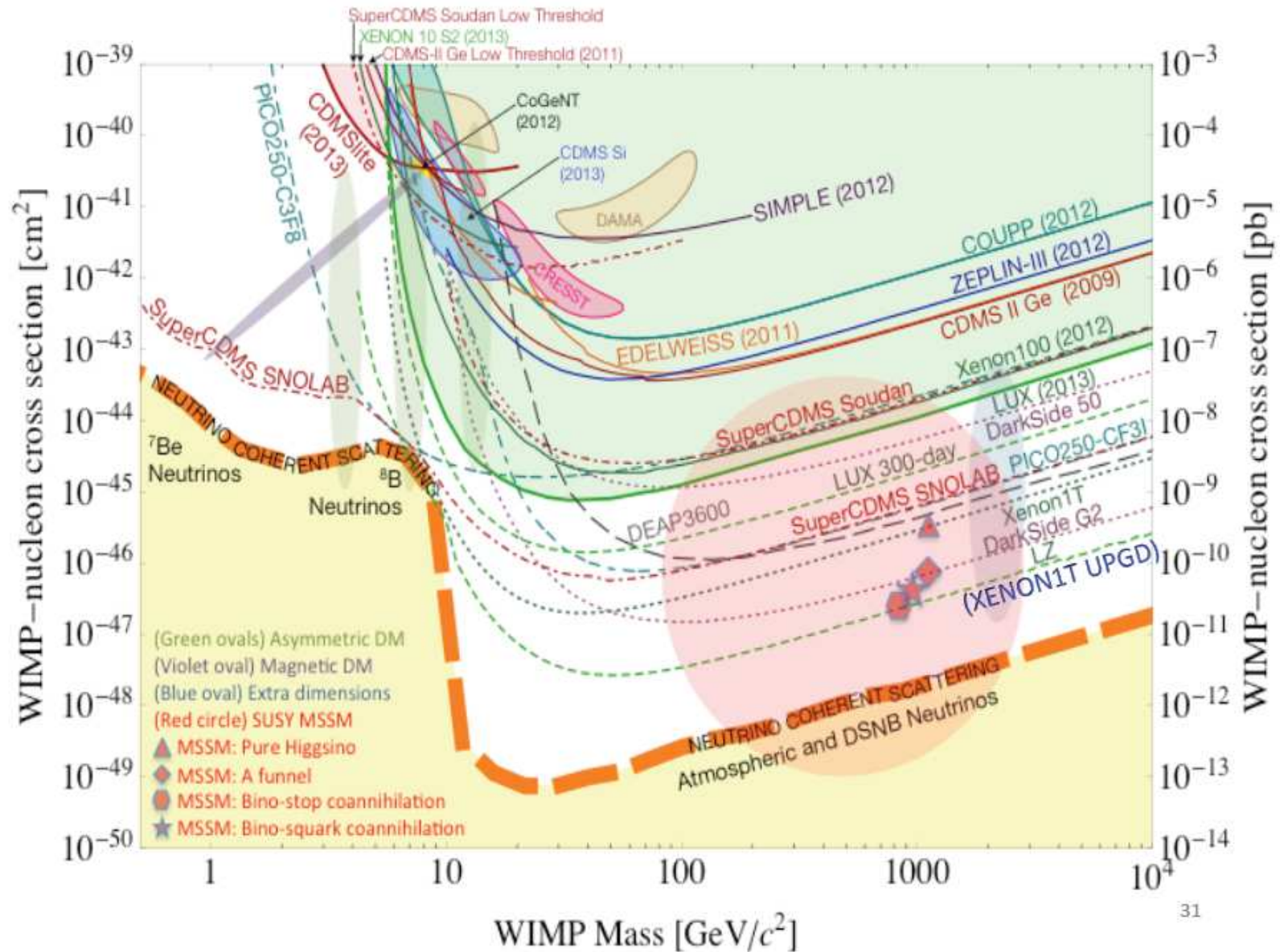


- neutrino ν – hot DM
- neutralino χ
- “generic” WIMP
- axion a
- axino \tilde{a}
- gravitino \tilde{G}
- wimpzilla,...

どんな場所で実験されているのか



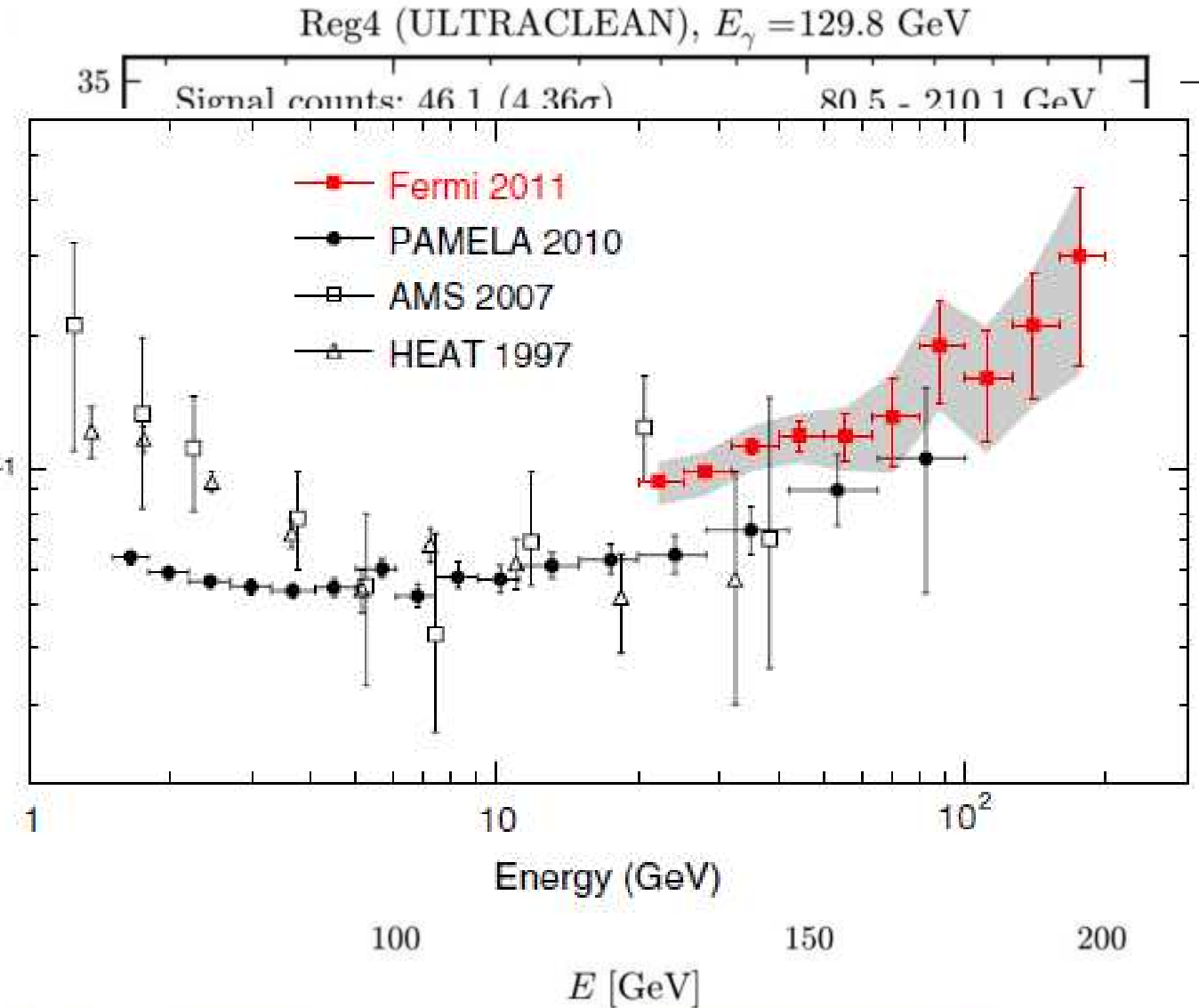
直接探索の進歩: WIMPの検出を焦点に



間接探索実験：陽電子比

Indirect Searches for DM

Cont
 χ
 χ
Ann
对消



Why Increase in $e^+/e^- \Rightarrow$ Dark Matter? 1/2

なぜ e^+/e^- の増加がダークマターに結びつくの?

Sources of cosmic rays in Galaxy 銀河系内の宇宙線源:

- Supernova remnants 超新星残骸

Acceleration takes place in ionized plasma and very slowly (~ 1 year)

電離したプラズマ中でゆっくり(~ 1 年)加速される

\Rightarrow Proton+alpha (99%) and electron($\sim 1\%$)

- Pulsars (and pulsar wind nebulae) パルサー(とパルサー星雲)

Acceleration takes place in vacuum and very fast (< 1 sec)

真空中で急速に(1秒以内)加速される

\Rightarrow Positron(50%) and electron (50%)

Cosmic rays observed at Earth: proton+alpha (99%) + electron ($\sim 1\%$)

地球で観測される宇宙線:陽子+アルファ(99%)と電子($\sim 1\%$)

Supernova remnants were considered as the dominant sources of CR

超新星残骸が主たる宇宙線源と考えられてきた

Why Increase in $e^+/e^- \Rightarrow$ Dark Matter? 2/2

なぜ e^+/e^- の増加がダークマターに結びつくの?

PAMELAがエネルギーが上がると陽電子比が増えることを発見したとき、パルサーの貢献を含めないGALPROPの予言を使った

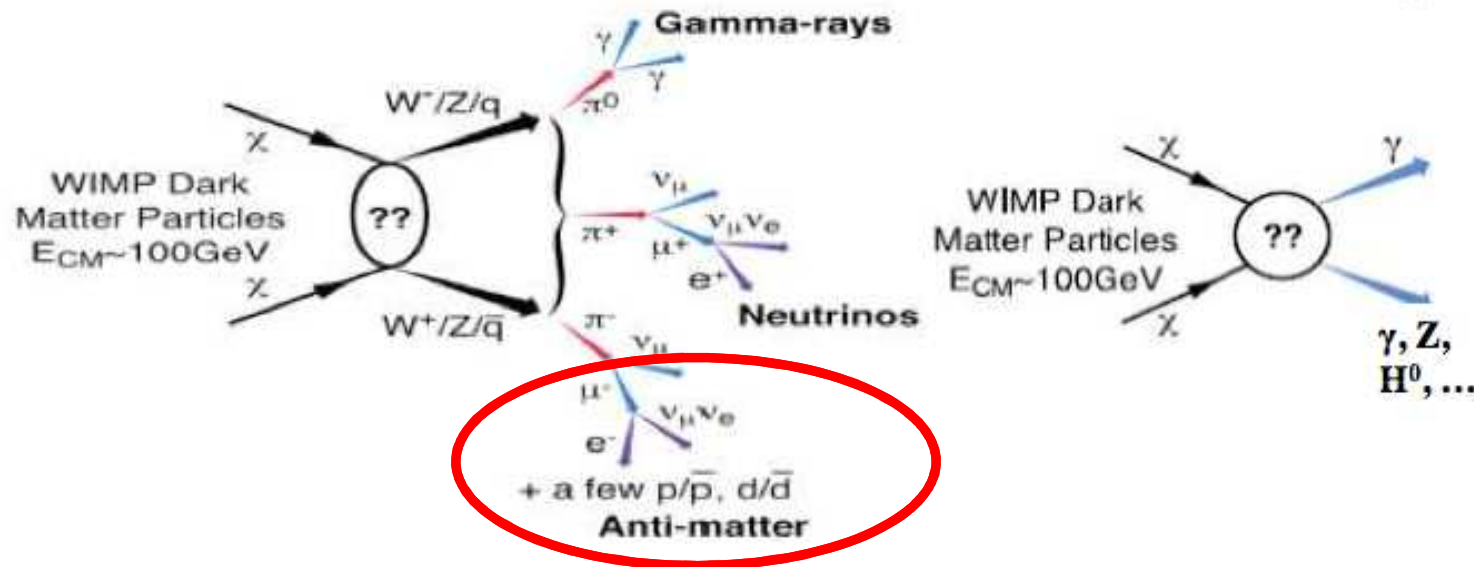
PAMELA の Nature論文は、センセーショナルに“anomaly”とした

宇宙線陽電子の源となる天体は2つある

- ダークマター粒子の対消滅か崩壊(電荷はゼロ): $e^+/e^- = 1.0$
- パルサーとその周り(真空から粒子を作る): $e^+/e^- = 1.0$

この2つは、共に、“anomaly”を生み出し得る

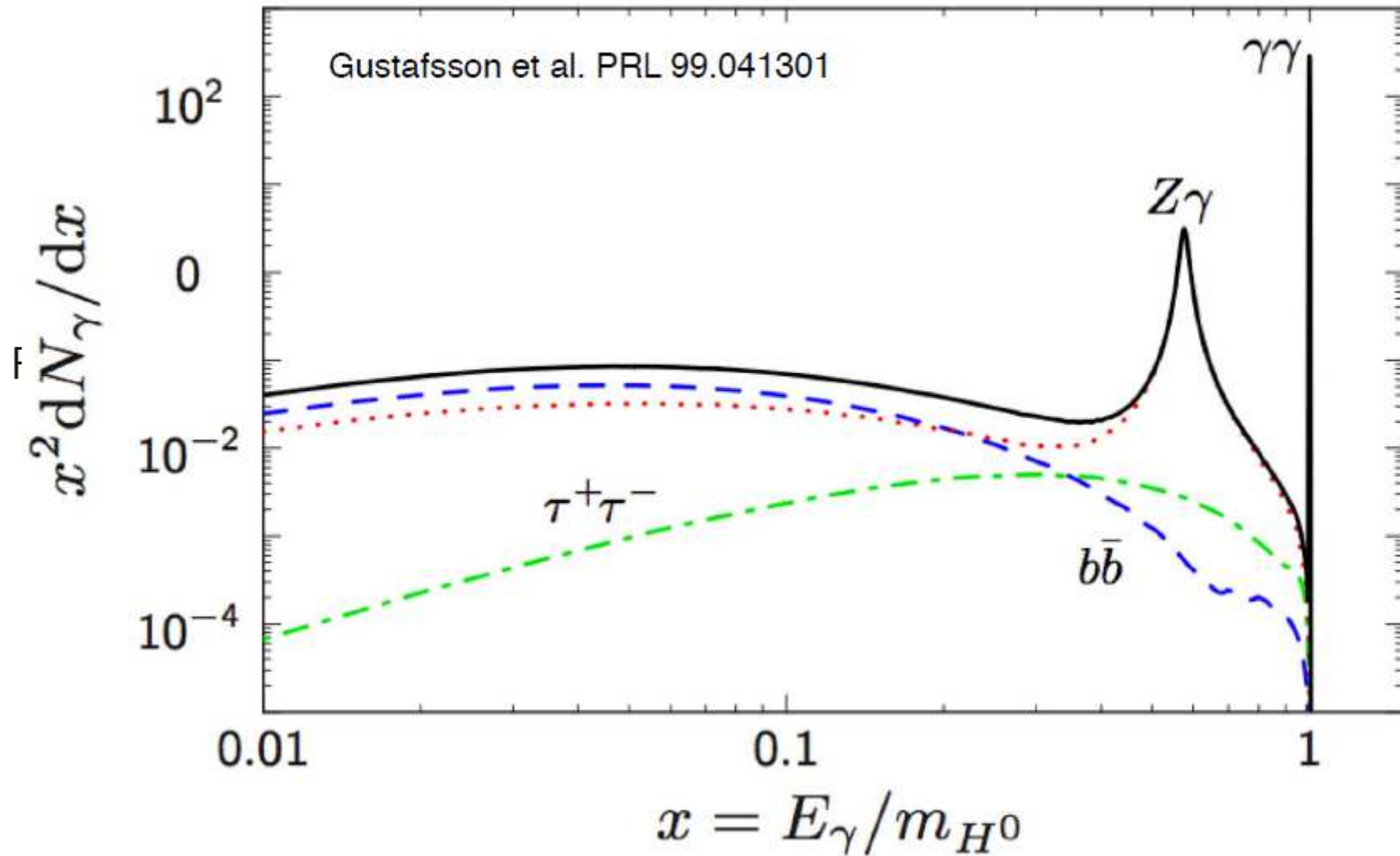
地球に到来する宇宙線での間接的DM探索



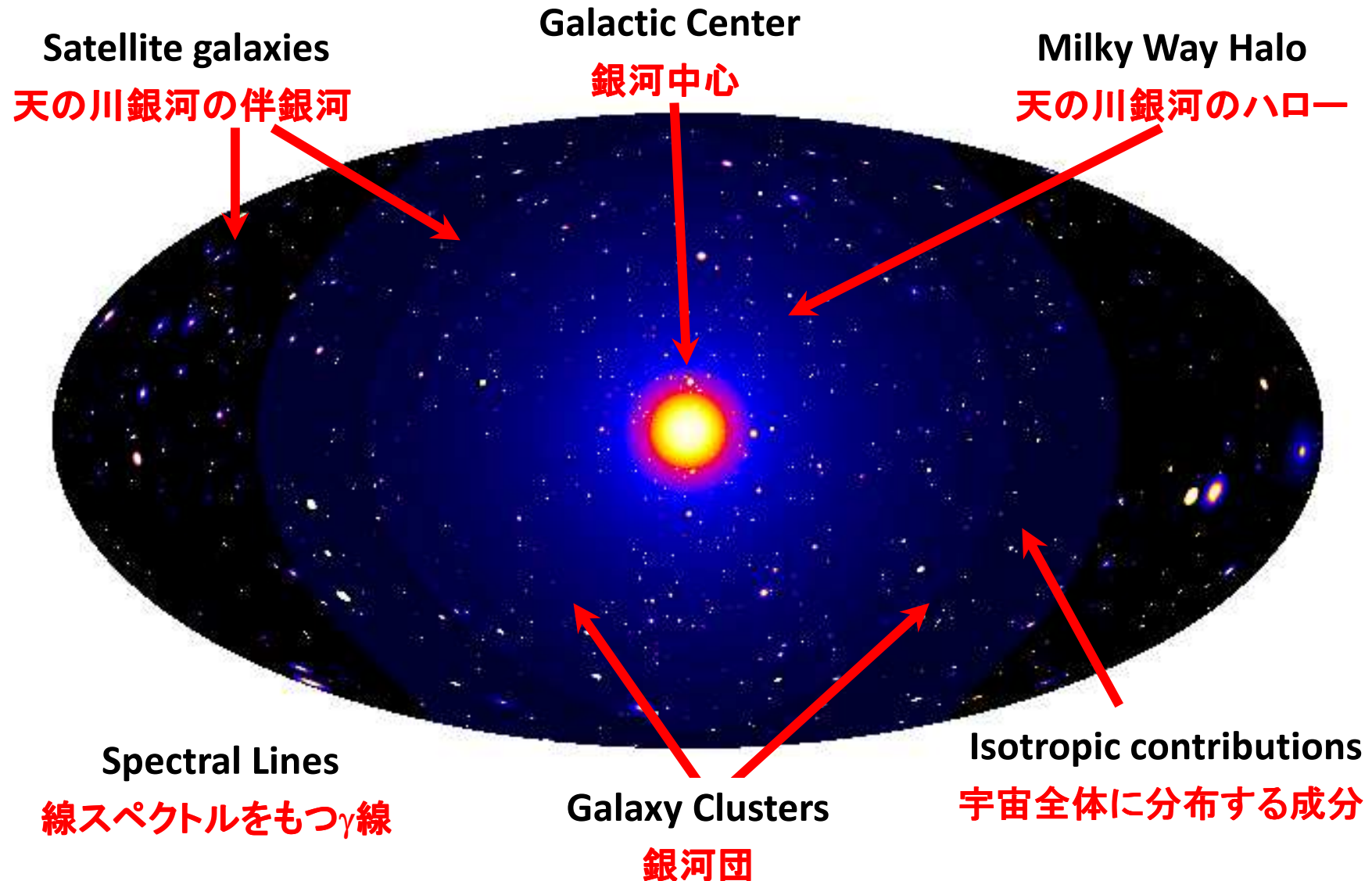
DM粒子の崩壊や対消滅で、荷電宇宙線が発生

- 荷電粒子は銀河磁場で方向の情報を失うため、**スペクトルの異常**を探す
- 近くのパルサー星雲、パルサー、超新星残骸も、**CRスペクトルを歪める**

荷電宇宙線スペクトルとダークマター



フェルミ衛星でのDM起源の γ 線 探索



ガンマ線観測による間接探索: 「期待される信号の強さ」

Stefano Profumo[†]

arXiv:1301.0952v1

$$\phi_\gamma = \frac{\Delta\Omega}{4\pi} J \frac{\langle\sigma v\rangle}{2m_\chi^2} \frac{dN_\gamma}{dE_\gamma}$$

↑
検出器の
有効面積

↑
DMの消滅で
ガンマ線が放
出される割合

↑
DMが消滅
する頻度

1. Dwarf Spheroidal Galaxies 天の川銀河の伴銀河

- Draco, $J \sim 10^{19} \text{ GeV}^2/\text{cm}^5$, \pm a factor 1.5;
- Ursa Minor, $J \sim 10^{19} \text{ GeV}^2/\text{cm}^5$, \pm a factor 1.5;
- Segue, $J \sim 10^{20} \text{ GeV}^2/\text{cm}^5$, \pm a factor 3

バックグラウンド
極小

2. Local Milky-Way-like galaxies 近傍銀河

- M31, $J \sim 10^{20} \text{ GeV}^2/\text{cm}^5$

3. Local clusters of galaxies 近傍銀河団

- Fornax, $J \sim 10^{18} \text{ GeV}^2/\text{cm}^5$
- Coma, $J \sim 10^{17} \text{ GeV}^2/\text{cm}^5$
- Bullet, $J \sim 10^{14} \text{ GeV}^2/\text{cm}^5$

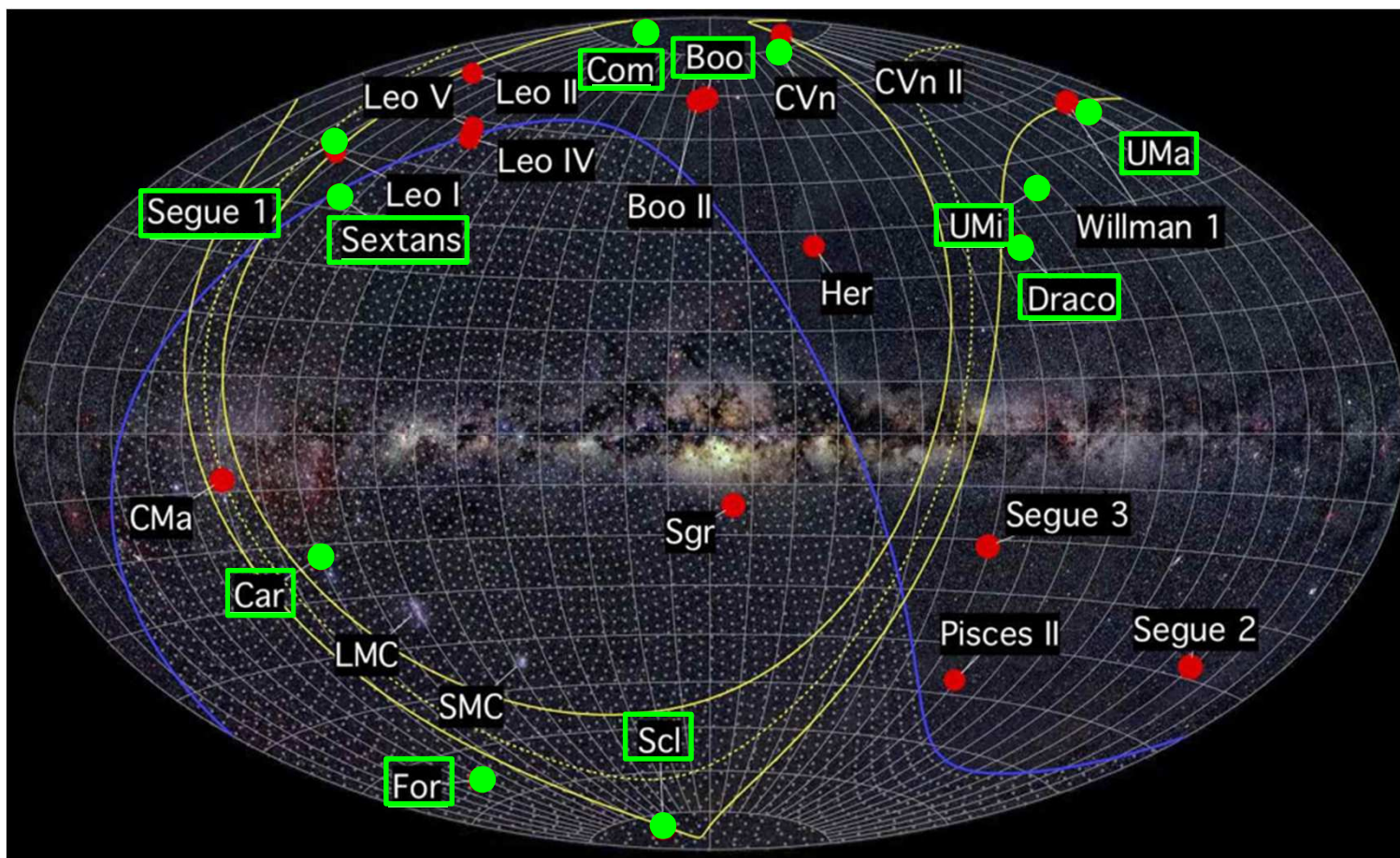
4. Galactic center 銀河中心

- 0.1° : $J \sim 10^{22} \dots 10^{25} \text{ GeV}^2/\text{cm}^5$
- 1° : $J \sim 10^{22} \dots 10^{24} \text{ GeV}^2/\text{cm}^5$

バックグラウンド
極大

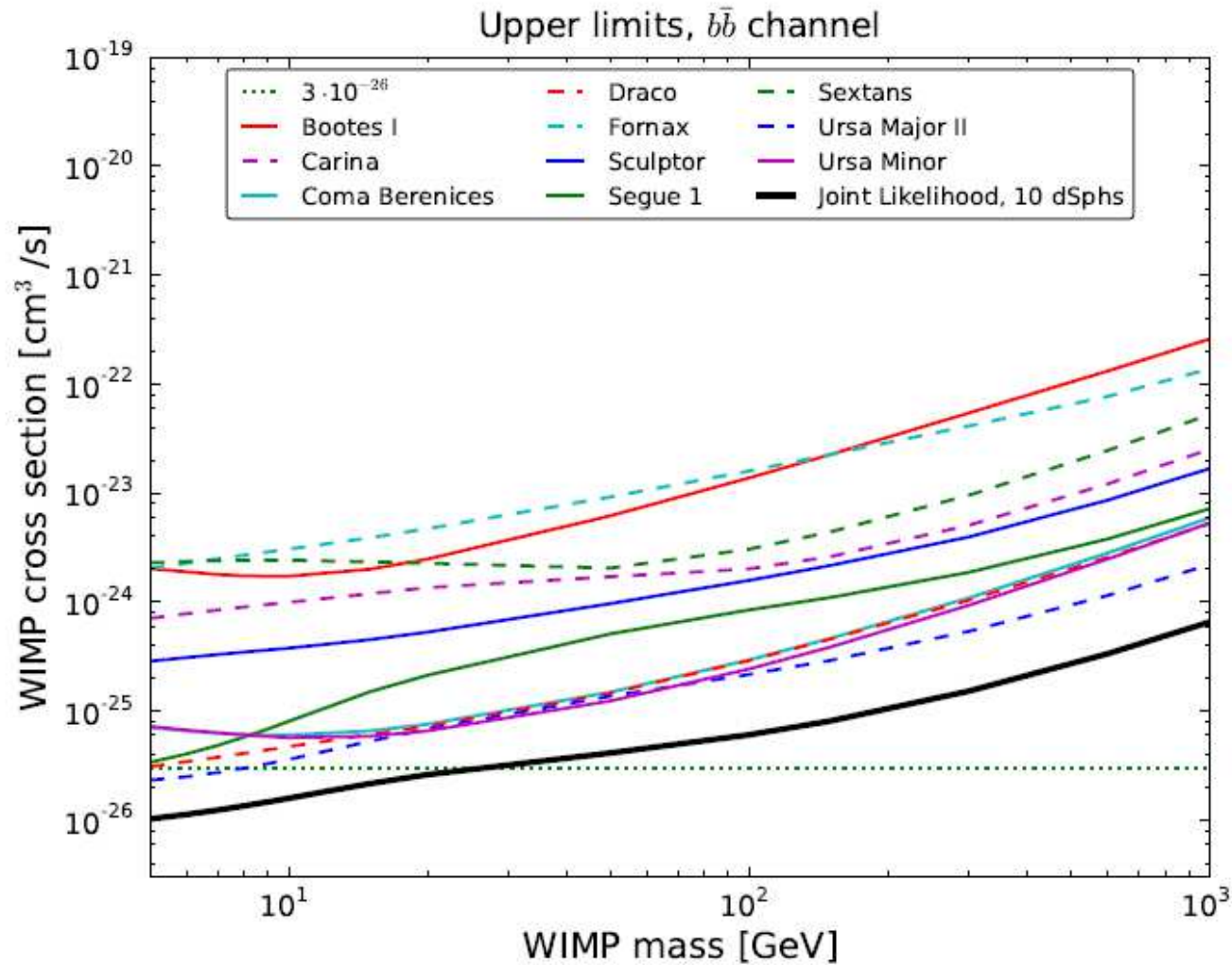
天の川銀河の周りにはある矮小銀河からのガンマ線

矮小銀河はダークマターの存在比が大きいらしい+バックグラウンドが極小



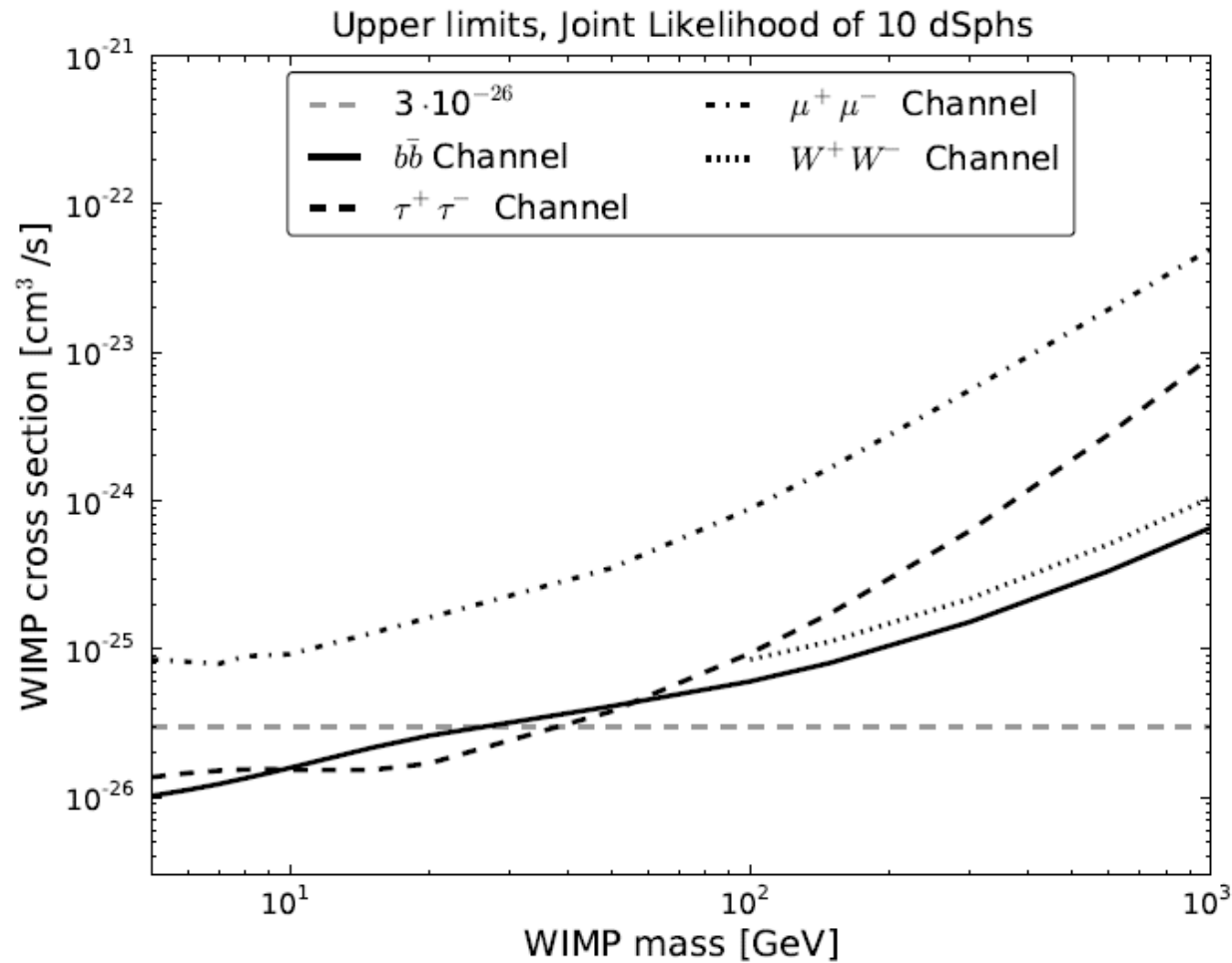
フェルミの矮小銀河からのガンマ線観測による制限 1/2

Assume
 $\chi\chi \Rightarrow b\bar{b}$



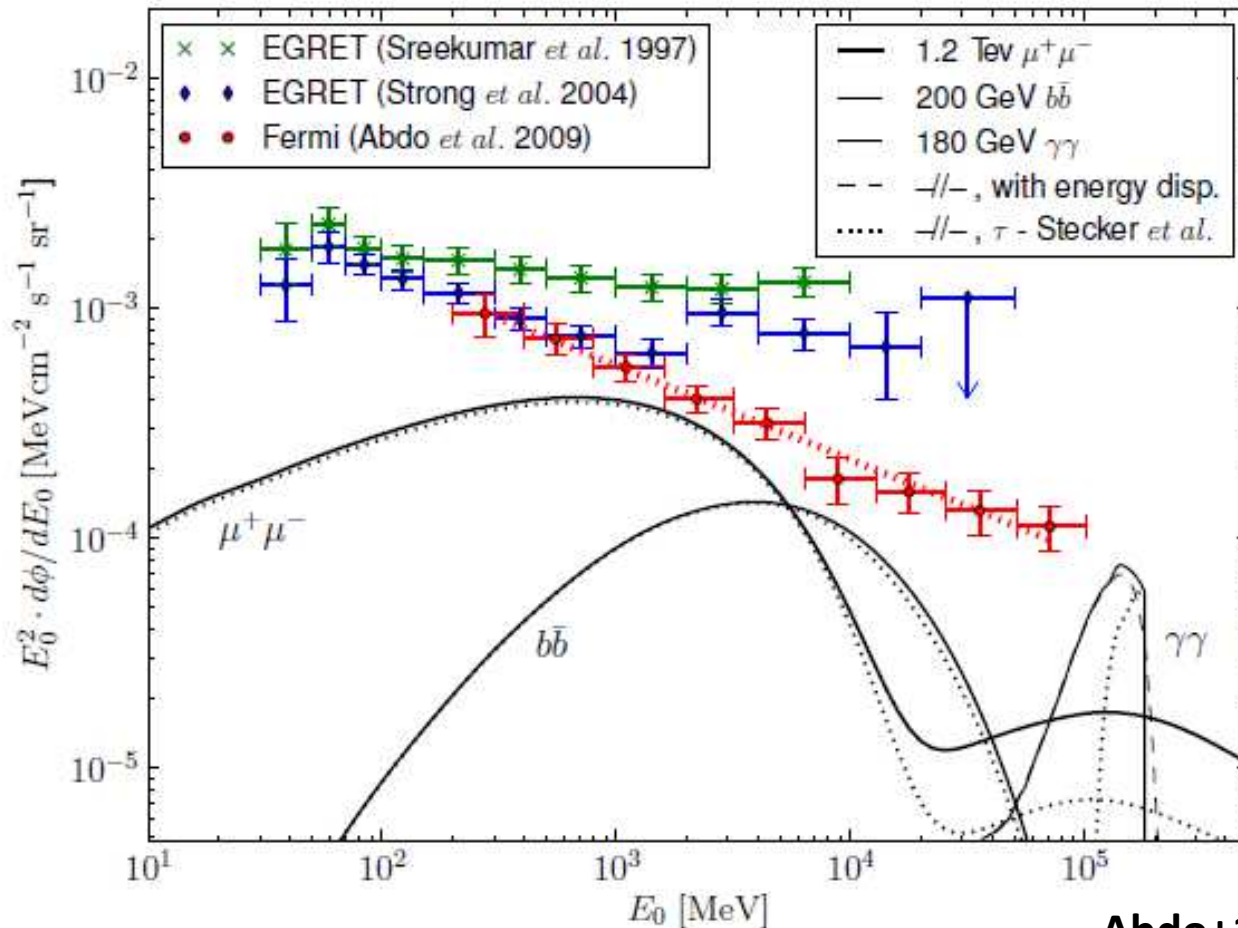
フェルミの矮小銀河からのガンマ線観測による制限 2/2

Assume
 $\chi\chi \Rightarrow \mu\mu$
 $\tau\tau$
 WW



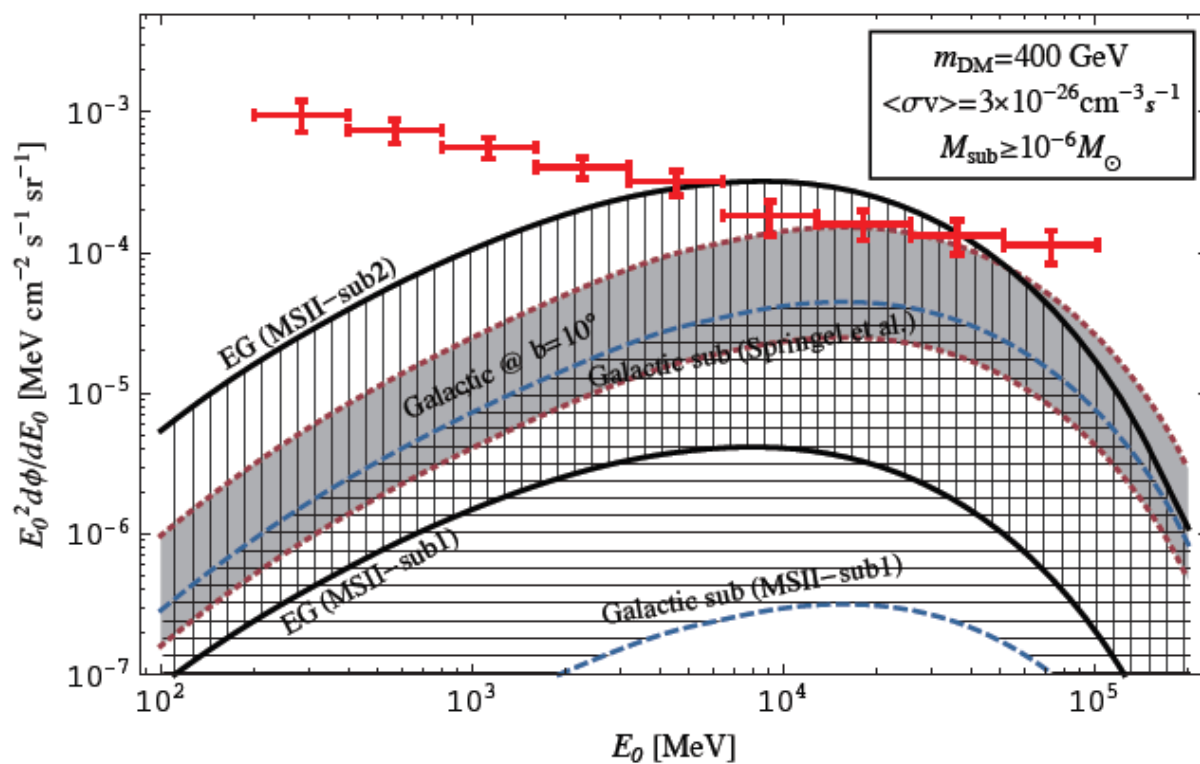
フェルミの銀河系外からのガンマ線観測による制限 1/2

最も包括的な制限を与える探索である



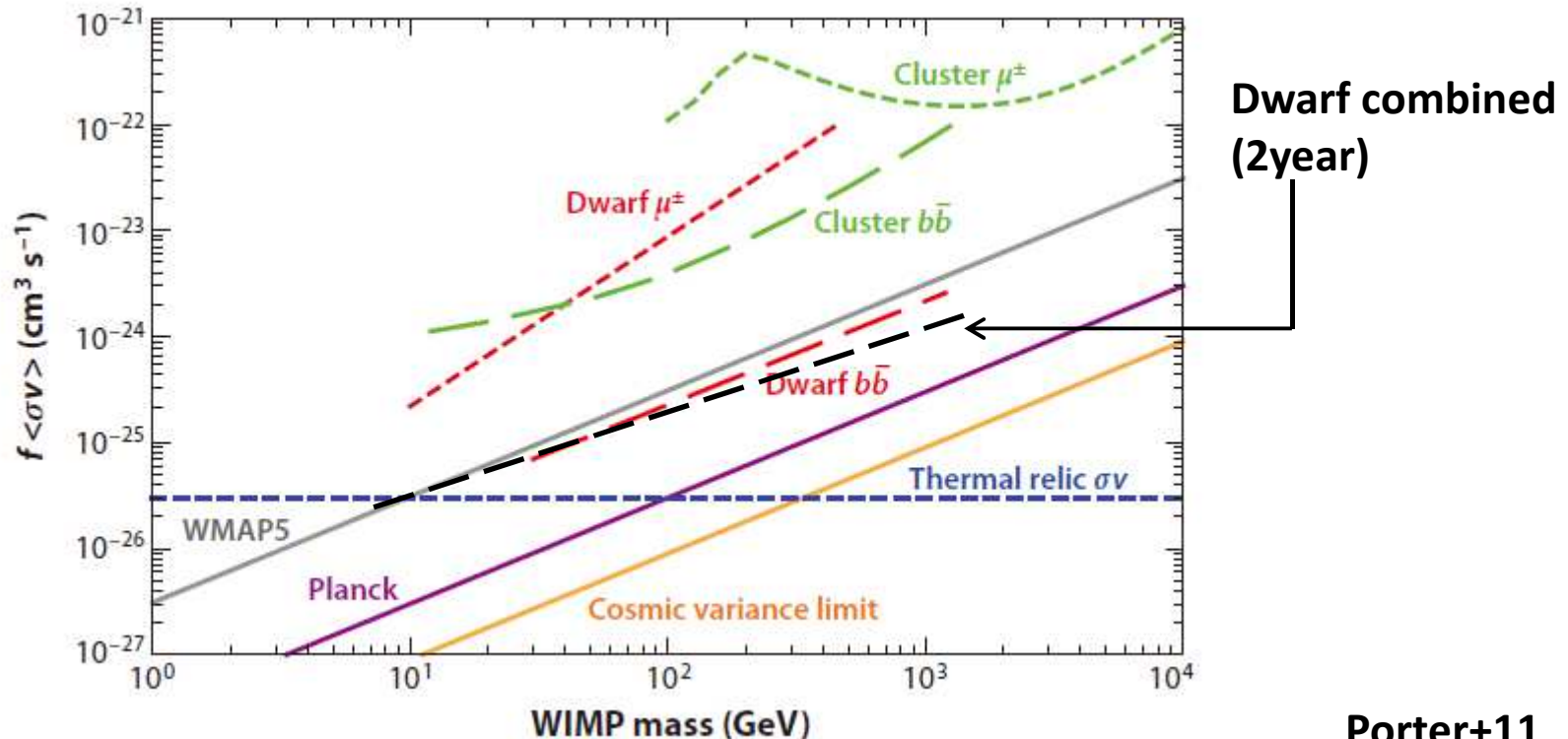
フェルミの銀河系外からのガンマ線観測による制限 2/2

天の川銀河が作り出すガンマ線がバックグラウンドとなる



フェルミが現時点でつけるダークマターに対する制限

- Dwarf sph obs give stronger limits for $\bar{b}b$ final state
矮小銀河の観測がダークマターが $b\bar{b}$ への崩壊を強く制限
- Clusters and dSphs give limits in different mass ranges
銀河団の観測と矮小銀河の観測が異なる質量領域で制限を与える



暗い星、ブラックホール、ニュートリノ、アキシオン？

Snowmass 2013 Cosmic Frontier 3 arXiv:1310.8642v1

- 暗い星はMACHO実験などから強く制限されている: 次のページの図

Review: Tisserand Dark 2007

- 初期宇宙の軽いブラックホールの可能性: $3 \times 10^{-13} M_{\odot} - 2 \times 10^{-8} M_{\odot}$

While there are many theoretical ideas on how to create PBH DM, none of them is predictive enough to pinpoint the mass range of the resulting PBH DM. Observational constraints eliminate most of the mass range, except for a window between $3 \times 10^{-13} M_{\odot}$ and $2 \times 10^{-8} M_{\odot}$, where the lower limit is set by recent femto-lensing results from the Fermi-Gamma-ray Burst Monitor data [192], and the upper limit is the combined MACHO/EROS constraints due to microlensing [193].

- ステライル・ニュートリノ

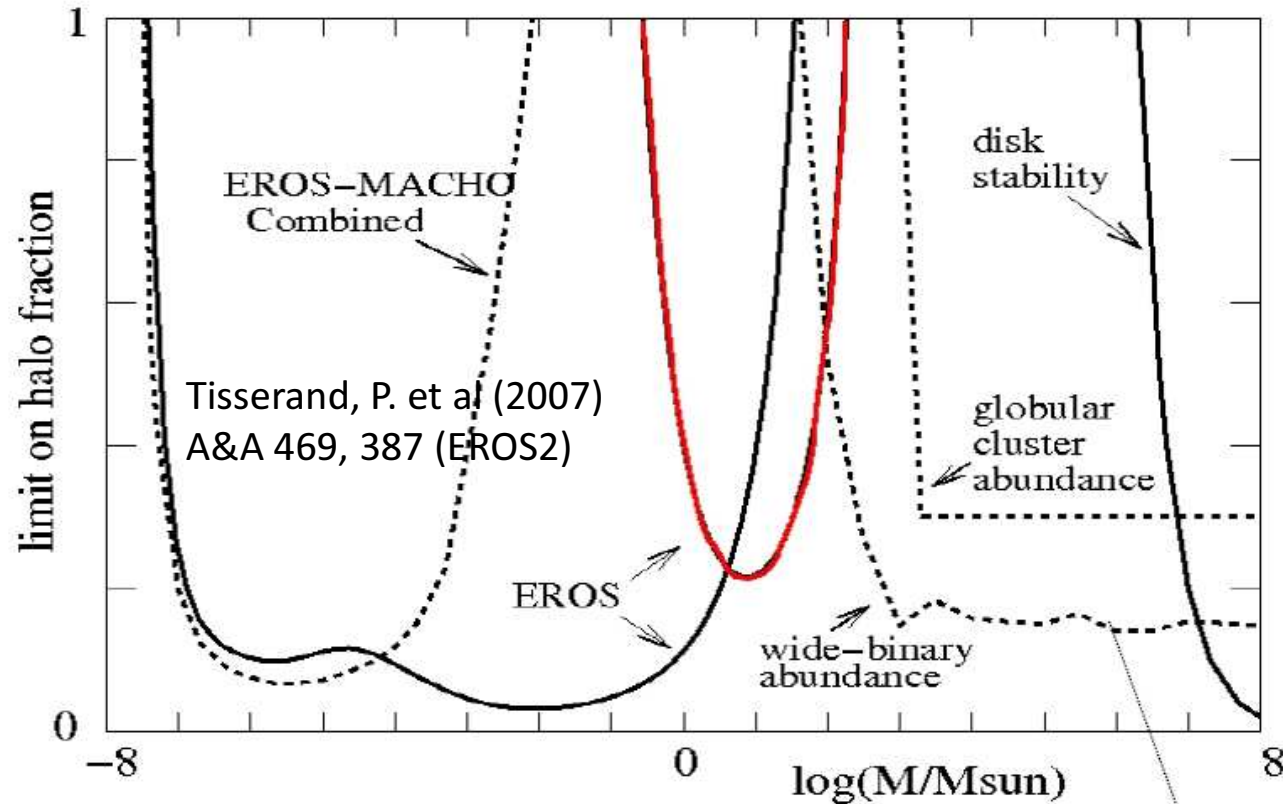
インフレーションのシナリオ、レプトンセクターの対称性などには、観測の制限範囲で、DMの一部がステライル・ニュートリノである可能性を残す。パルサーの反跳速度分布が説明できるとの説もある。崩壊で出る線スペクトルX線がAstroHで観測されるかも。

- アキシオンのような粒子 (Axio-Like Particles)

暗い星や小さなブラックホールは？

Closing the gap...

We looked for longer microlensing events (duration ~ year) We found none.



Yoo, Chaname and Gould [ApJ 601 (2004) 311]

ongoing exp. : _OGLE III and SuperMACHO
_AGAPE, MEGA and WeCaPP (toward M31)

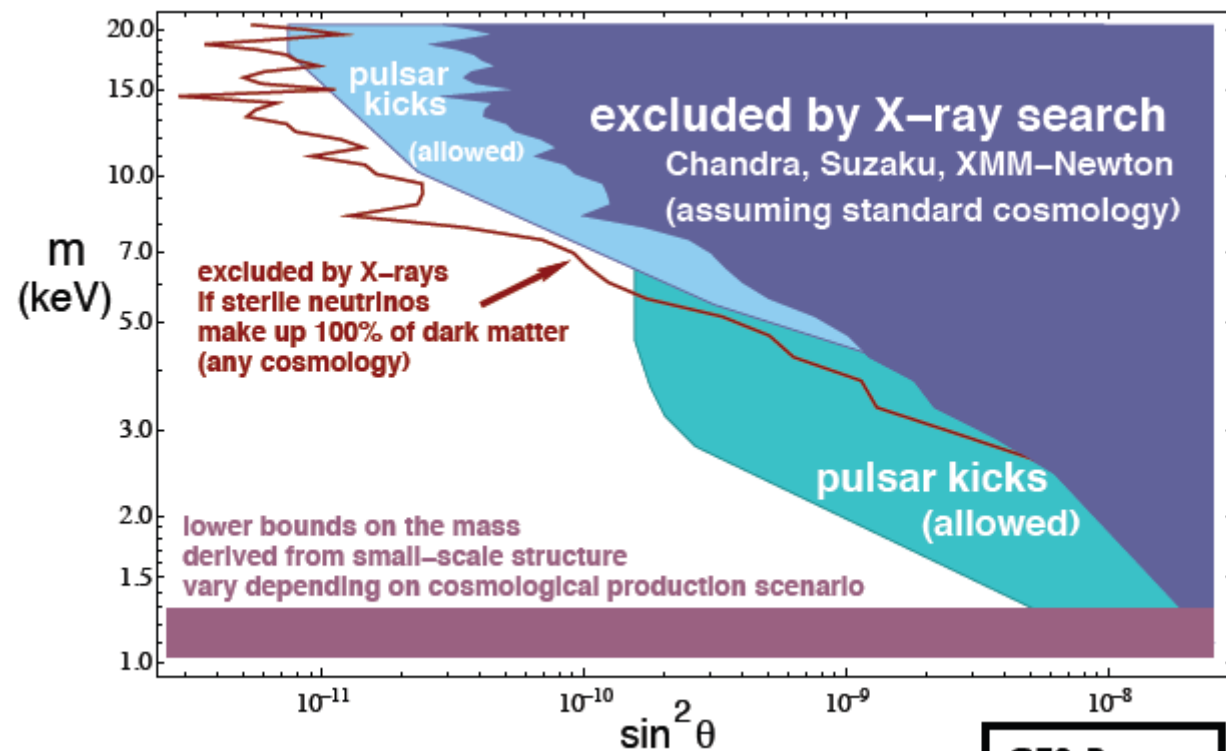
From P. Tisserand Dark 2007

Sterile Neutrino? 温かいDM

パートナーとなる電荷を持ったレプトンが無い、マヨラナ型のニュートリノ

◆ 最近の話題

- 中性子星誕生時にキックを与える？
- Chandraの線スペクトルの発見？
- ニュートリノ振動実験などから制限
- Planckの観測から制限



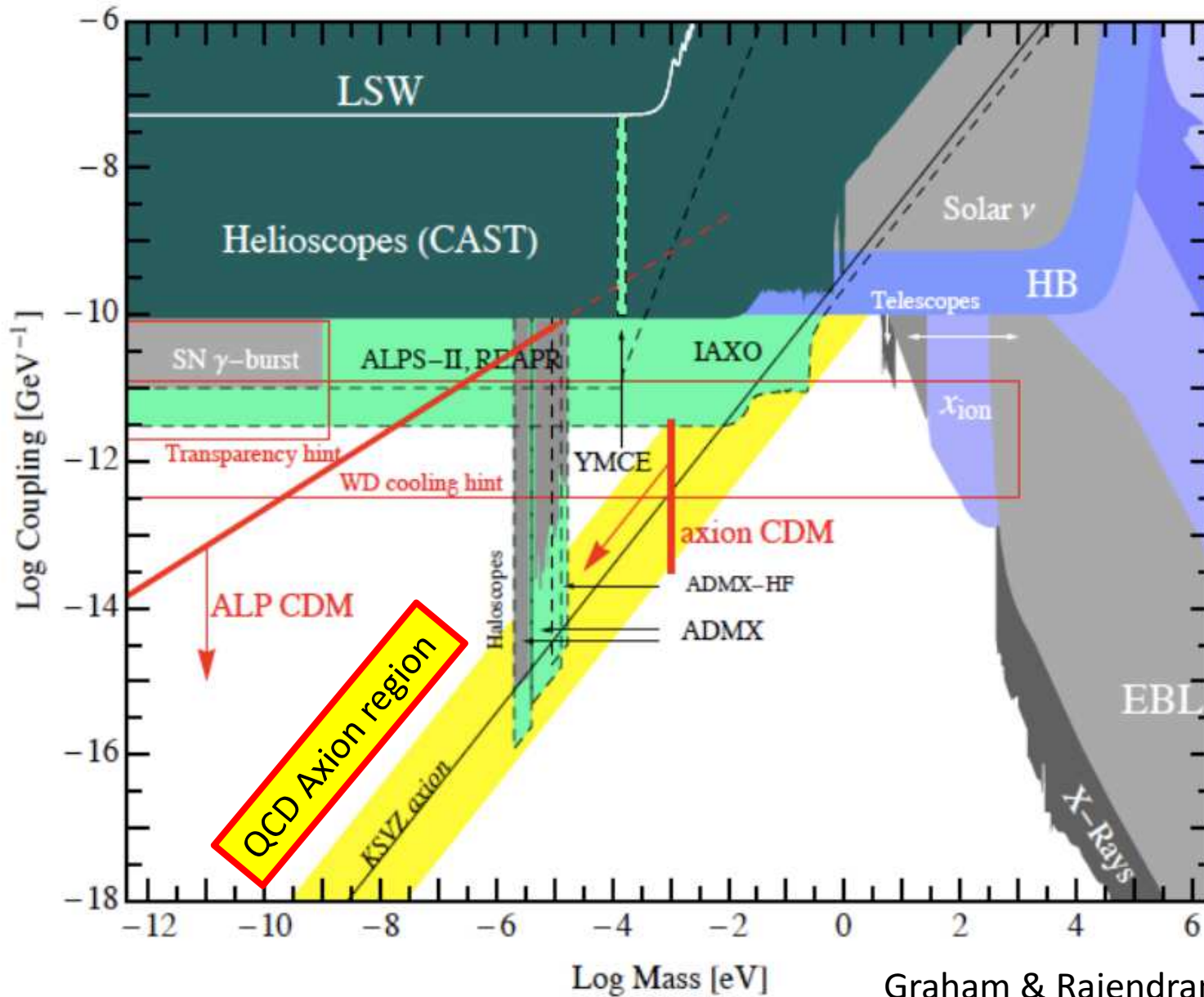
Axionてなに？

AxionからAxion-Like-Particleへ：歴史

- 理論：量子色力学(QCD)では、一般的に真空に位相が残る(**CPは保存されない**)
- 実験：QCDが支配する中性子の電気双極子の測定では**CPがよく保存されている**
- 位相差をキャンセルする**カイラル対称性**があるのでは：Peccei-Quinn
- Weinberg：そのような「場」があれば、自発的な対称性の破れで**新粒子**が現れる
- 最初に提案されたPQ-Axionは、すでに観測や実験で、存在しないことが判っている
- Strong-CP問題として捉えると、複雑なQCDの「真空」と絡む：いろいろな可能性があり、**Axion-Like-Particle**として捉え直されている。スピンやパリティも0マイナスと限らない
- いろいろな形で、光子や巨視的な磁場と結合する=>**星の進化、超新星爆発**

Axion-Like Particle (ALP): 熱い?温かい?冷たい?

arXiv:1306.6088v2

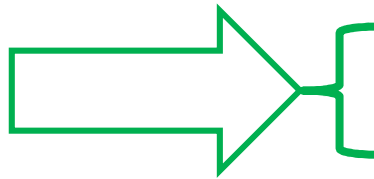
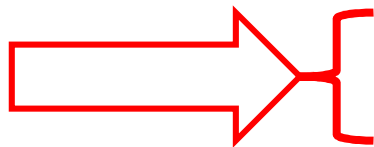


Graham & Rajendran 2013

ダークマター粒子を発見したとのクレイム

ダークマターを「発見したかも」との報告例

Experiment	Status of claim
DAMA/LIBRA annual modulation [68]	Unexplained at the moment; not confirmed by other experiments [70, 71, 74, 76]
CoGeNT excess events and annual modulation [73]	Tension with other data [70, 71, 74, 76]
CRESST excess events [79]	Tension with other data [70, 71, 74, 76]
EGRET excess of GeV photons [80, 81]	Due to instrument error (?) – not confirmed by Fermi-LAT [82]
INTEGRAL 511 keV γ -line from galactic centre region [83]	Does not seem to have spherical symmetry – shows an asymmetry which follows the disk (?) [84]
PAMELA: Anomalous ratio of cosmic ray positrons/electrons [85]	May be due to DM [86], or pulsars [87] – energy signature not unique for DM
Fermi-LAT positrons + electrons [31]	May be due to DM [86], or pulsars [87] – energy signature not unique for DM
Fermi-LAT GeV γ -ray excess towards galactic centre [88]	Unexplained at the moment – astrophysical explanations possible [89, 90], no statement from the Fermi-LAT collaboration
WMAP radio “haze” [91]	Has a correspondence in “Fermi bubbles” [92] – probably caused by outflow from the galactic centre
γ -ray structure [93] in public Fermi-LAT data [94] from galaxy clusters.	Very weak indication, could be cosmic-ray induced emission?
γ line at 130 GeV [95, 96, 97] in Fermi-LAT public data [94]	$3.3\sigma - 4.6\sigma$ effect, unexplained at the moment. Not confirmed by the Fermi-LAT collaboration [98].



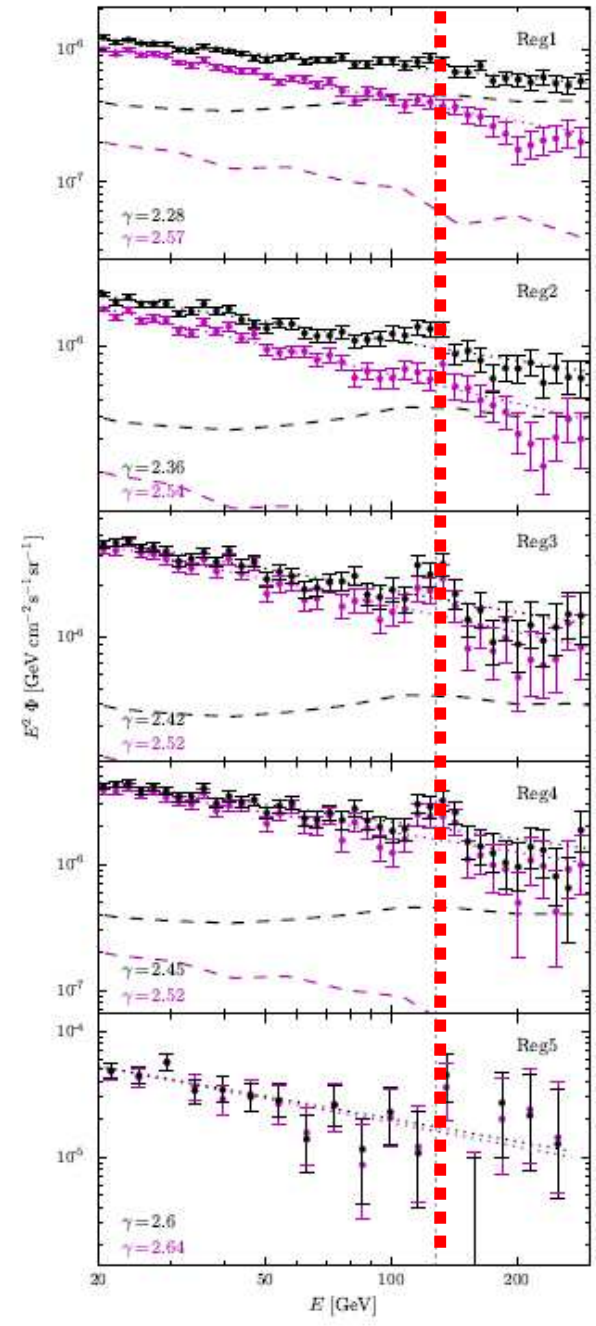
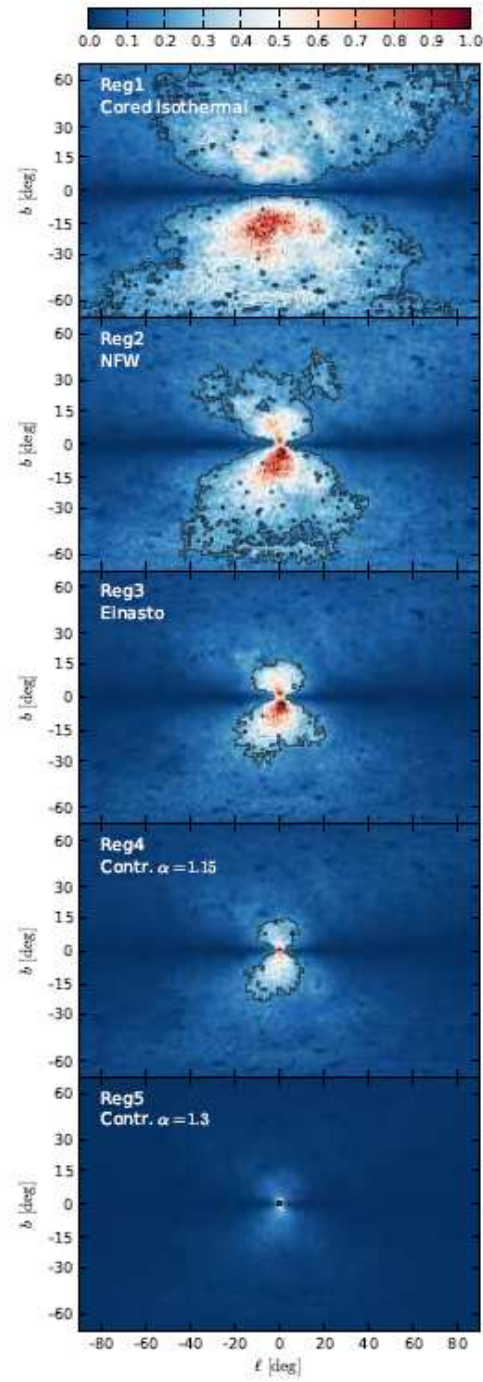
Taken from Bergström, Ann. Phys. (Berlin) 524, 2012

130GeVガンマ線

1/2

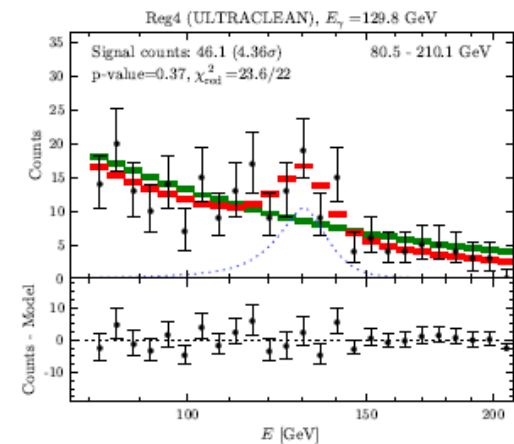
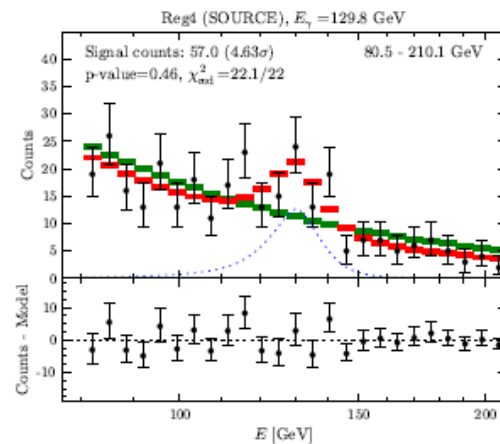
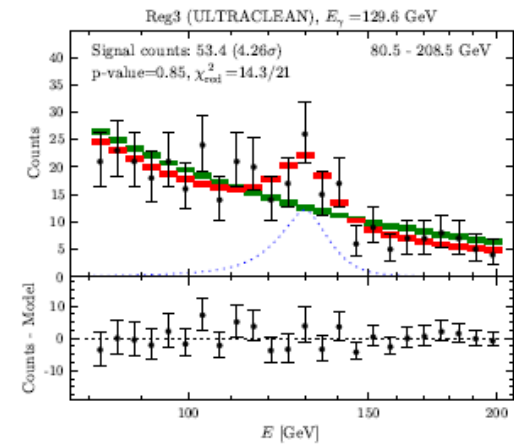
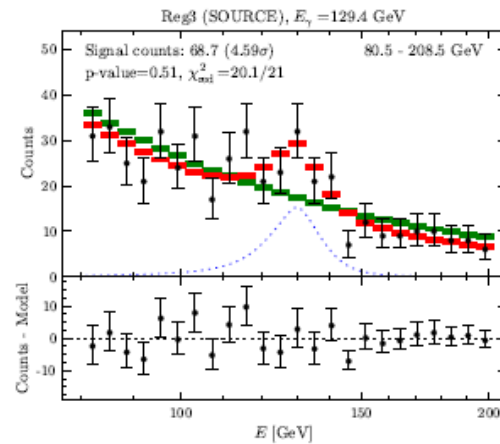
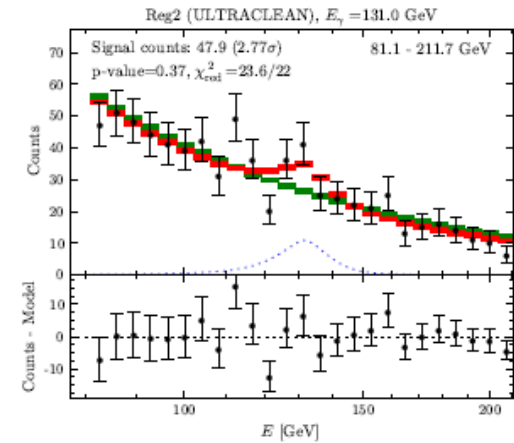
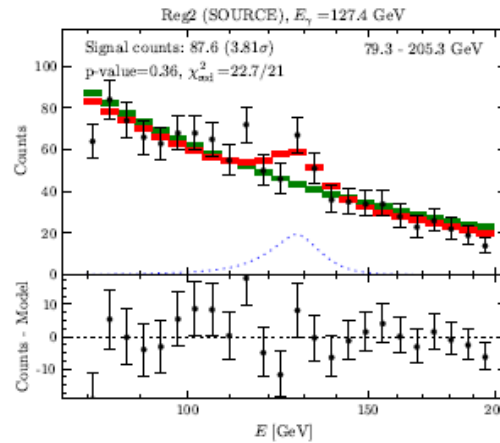
C. Weniger 2012

A line feature
found
near the GC



130GeVガンマ線 2/2

C. Weniger 2012



Fermi による単色ガンマ線探索 1/2

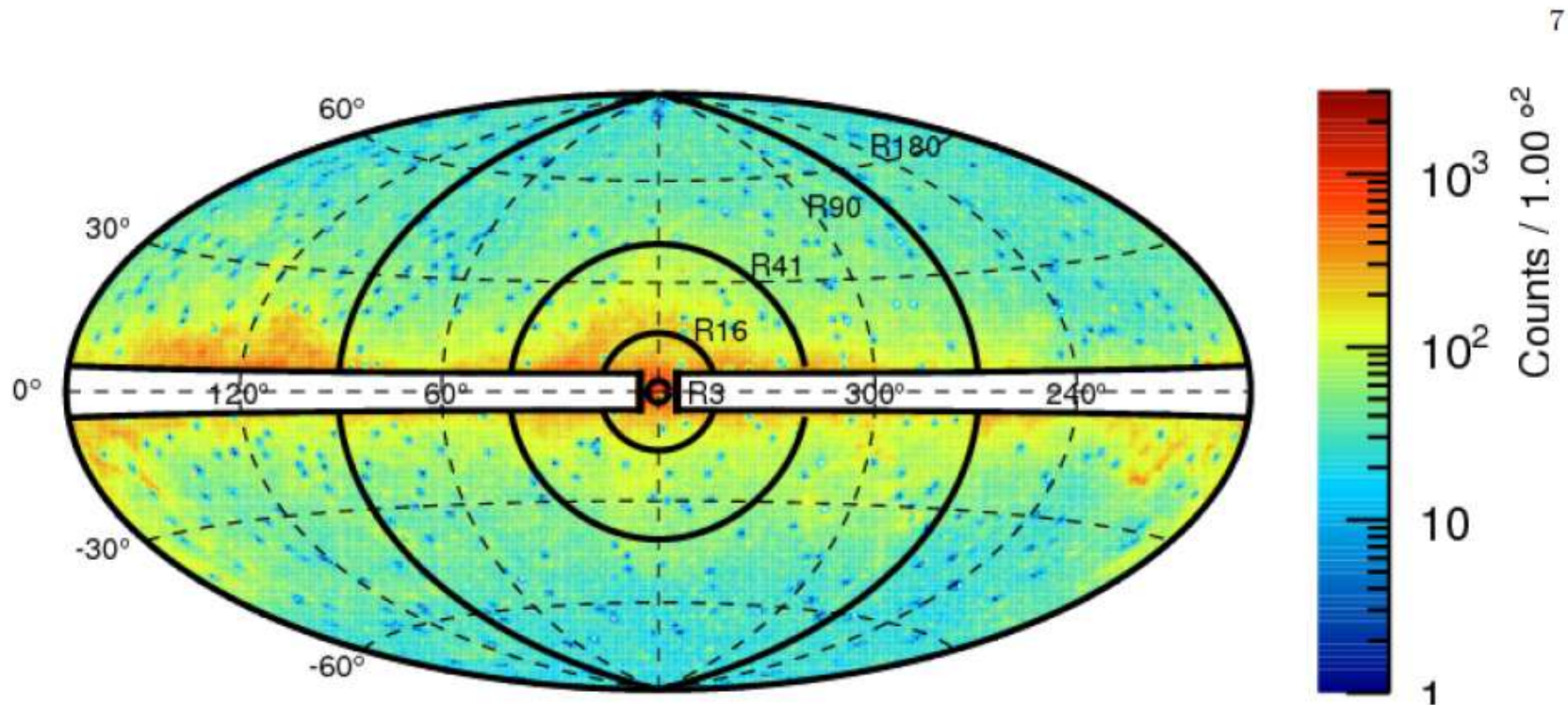
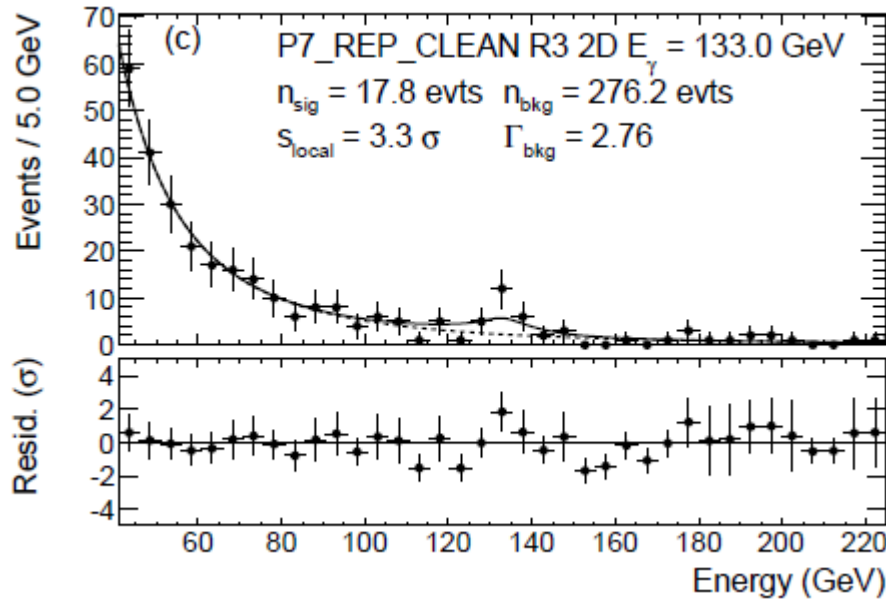


FIG. 2. Counts map for the line search dataset binned in $1^\circ \times 1^\circ$ spatial bins in the R180 ROI. This is plotted in Galactic coordinates using the Hammer-Aitoff projection. The energy range is 2.6–541 GeV and the most-significant 2FGL sources have been removed using an energy-dependent mask (see text). Also shown are the outlines of the other ROIs (R3, R16, R41, and R90) used in this search.

Fermi による単色ガンマ線探索 1/2



エネルギー分解能などを考慮して解析すると、130GeVに対して有意度は、 3.3σ となる

ガンマ線エネルギーが130GeV以外であった可能性も含めて解析し直すと有意度は 1.6σ になる

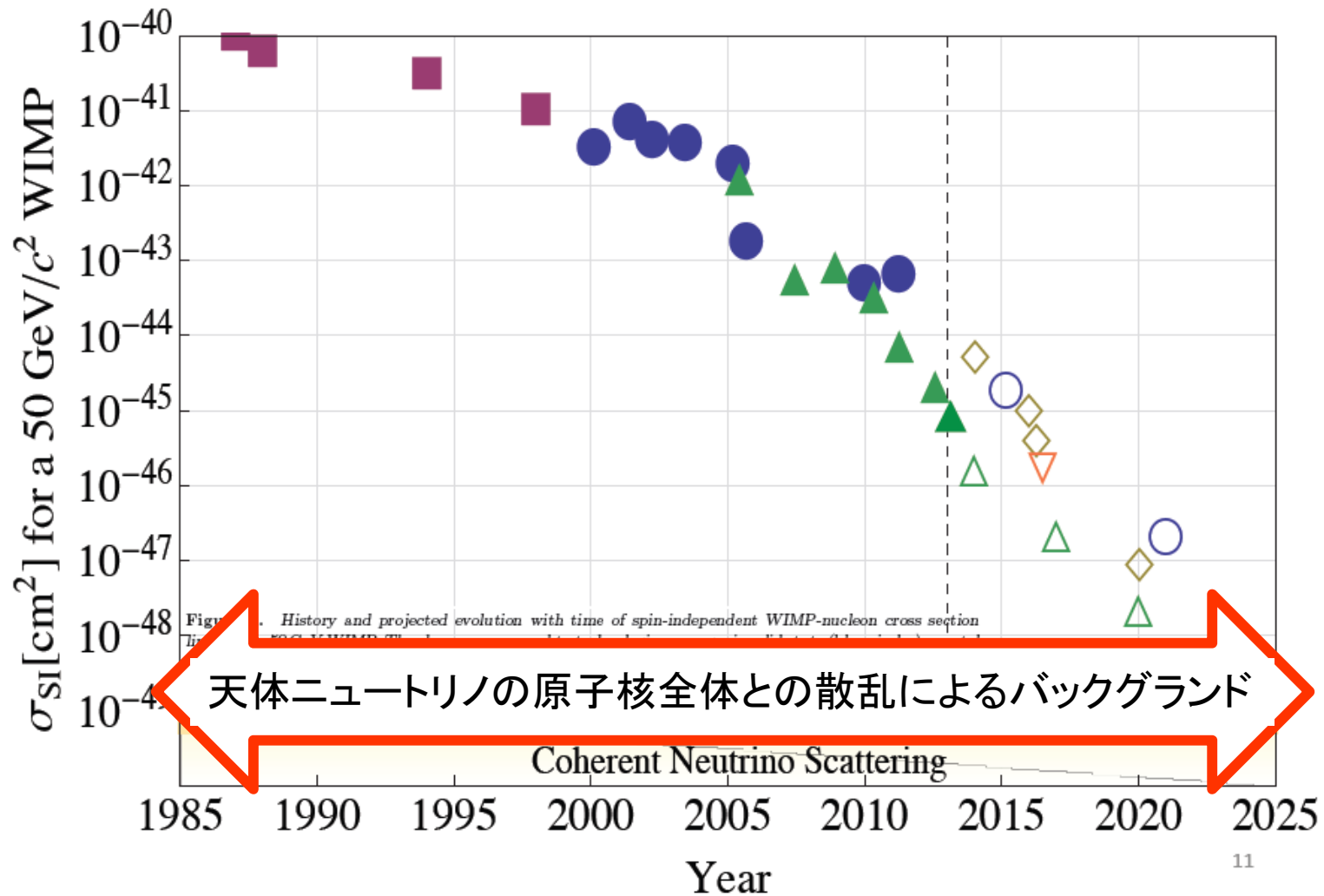
We did not find any globally significant lines in our *a priori* search regions and present 95% confidence limits for WIMP annihilation cross sections and decay lifetimes. Our most significant fit occurred at 133 GeV in our smallest search region and had a local significance of 3.3σ , which translates to a global significance of 1.6σ . We discuss potential systematic effects in this search and why the

今後の発展

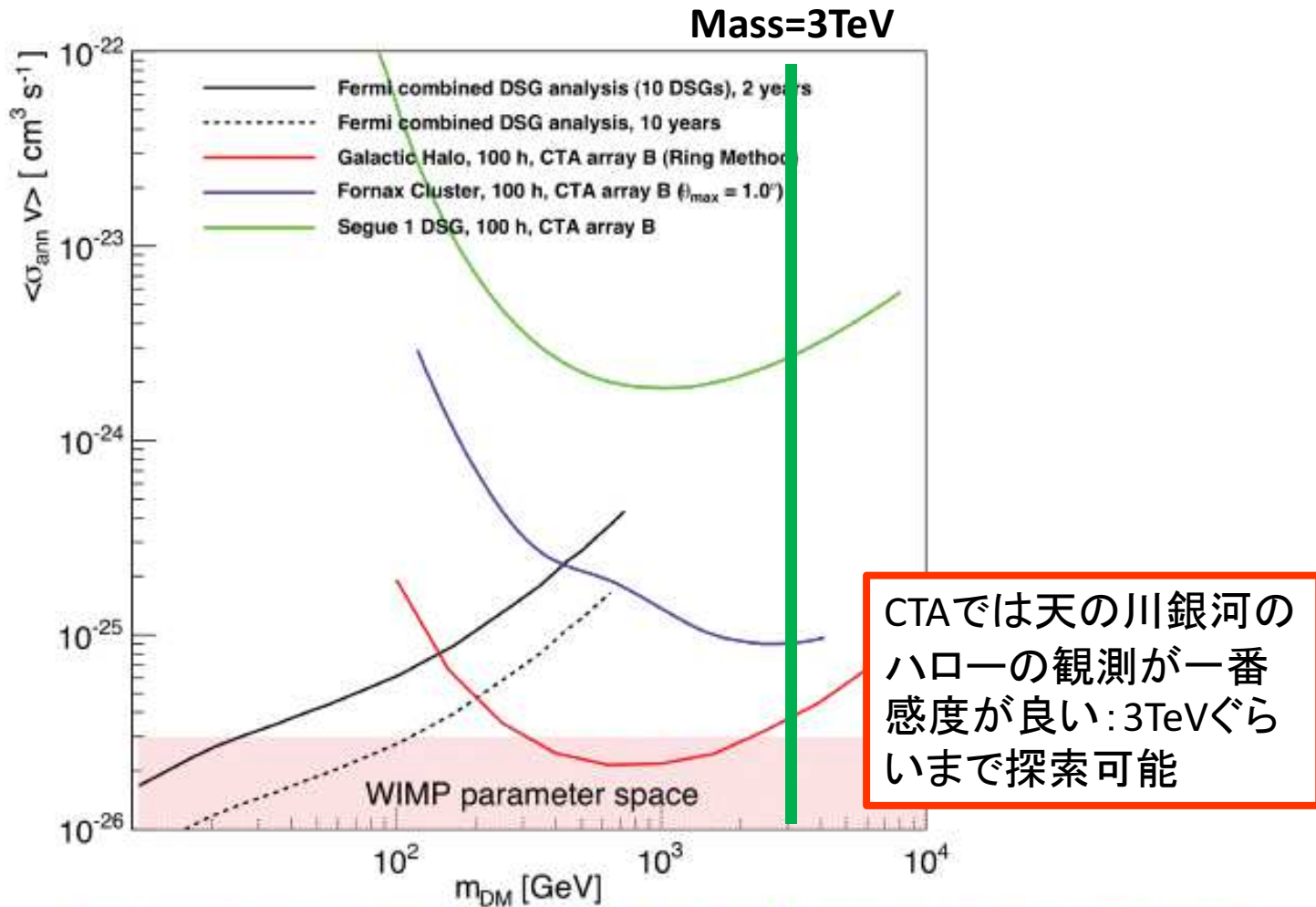
直接探索の進歩: WIMP

Taken from Nelson's presentation in P5 at SLAC 2 Dec 2013

Evolution of the WIMP–Nucleon σ_{SI}



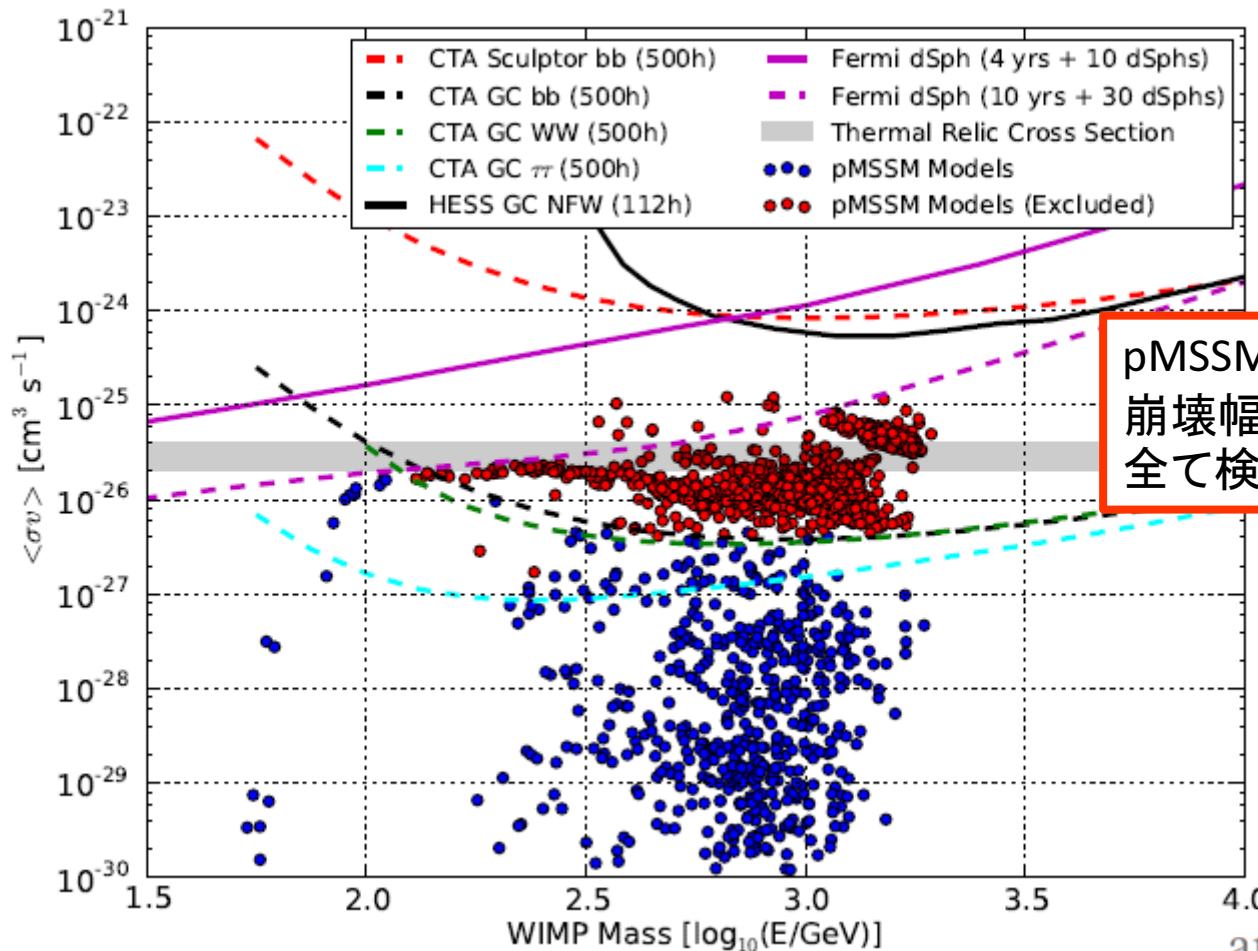
フェルミ衛星の10年間 + CTA: 矮小銀河の観測



CTA collaboration, *Astropart.Phys.* 43 (2013) 189-214, arXiv:1208.5356

ガンマ線観測による間接探査の進歩

	Fermi-LAT	H.E.S.S.	CTA
E_γ range	0.1 to 300 GeV	0.1 to 10 TeV	10 GeV to 10 TeV
A_{eff}	$\sim 1 \text{ m}^2$	$\sim 10^5 \text{ m}^2$	$\sim 10^6 \text{ m}^2$
T_{obs}	$\sim 10^8 \text{ s}$	$\sim 10^6 \text{ s}$	$\sim 10^6 \text{ s}$

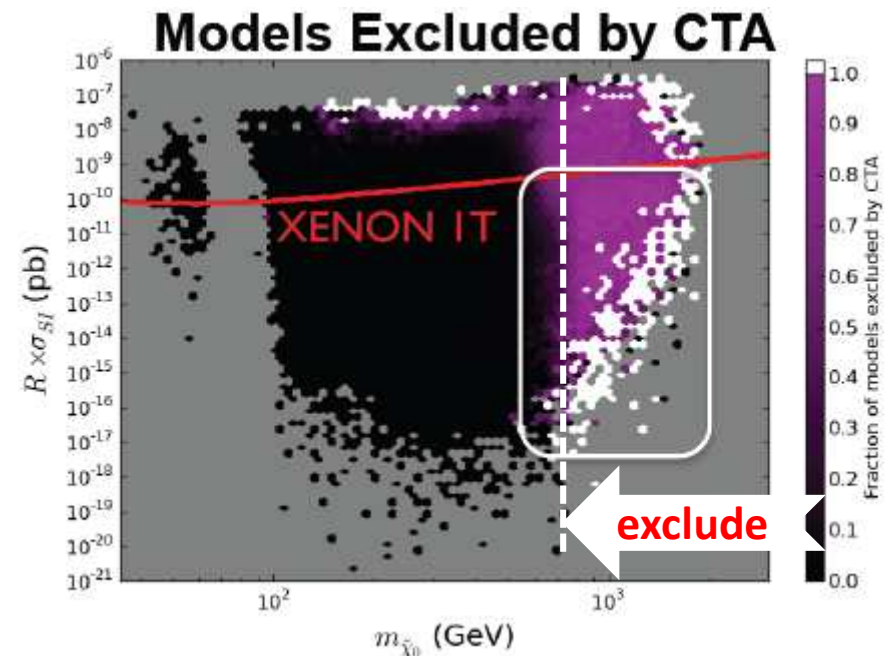
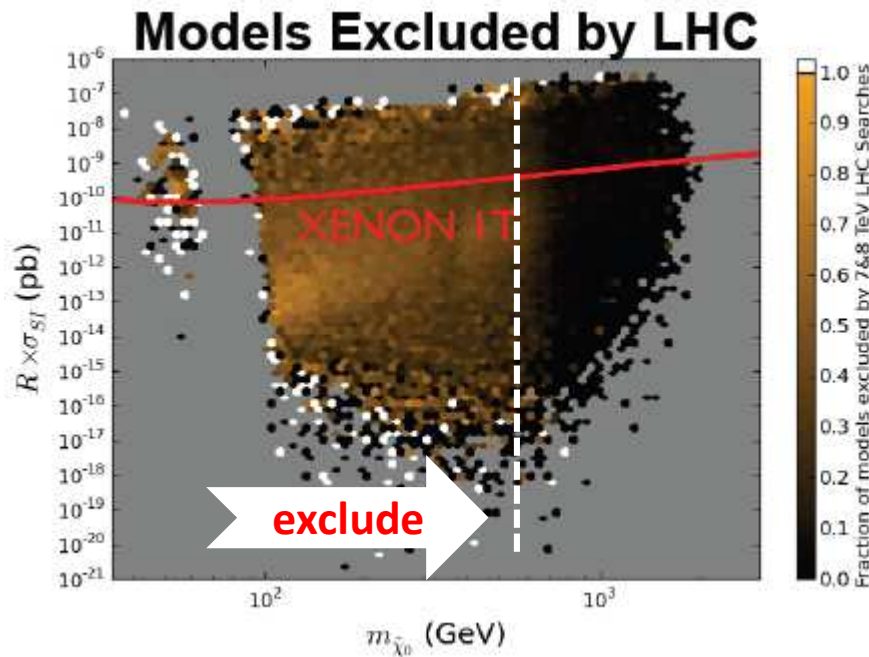


pMSSMモデルで2gへの崩壊幅が大きいものは全て検証/排除可能

ダークマター探索：今後の見通し

残念ながら、観測に対して予言能力があるのは、現象論的ミニマムSUSYだけであるので、未だに、その限られたモデルとしか比較できないでいる。

LHC: set limits from left to right



アキシオンのような粒子 (ALP)

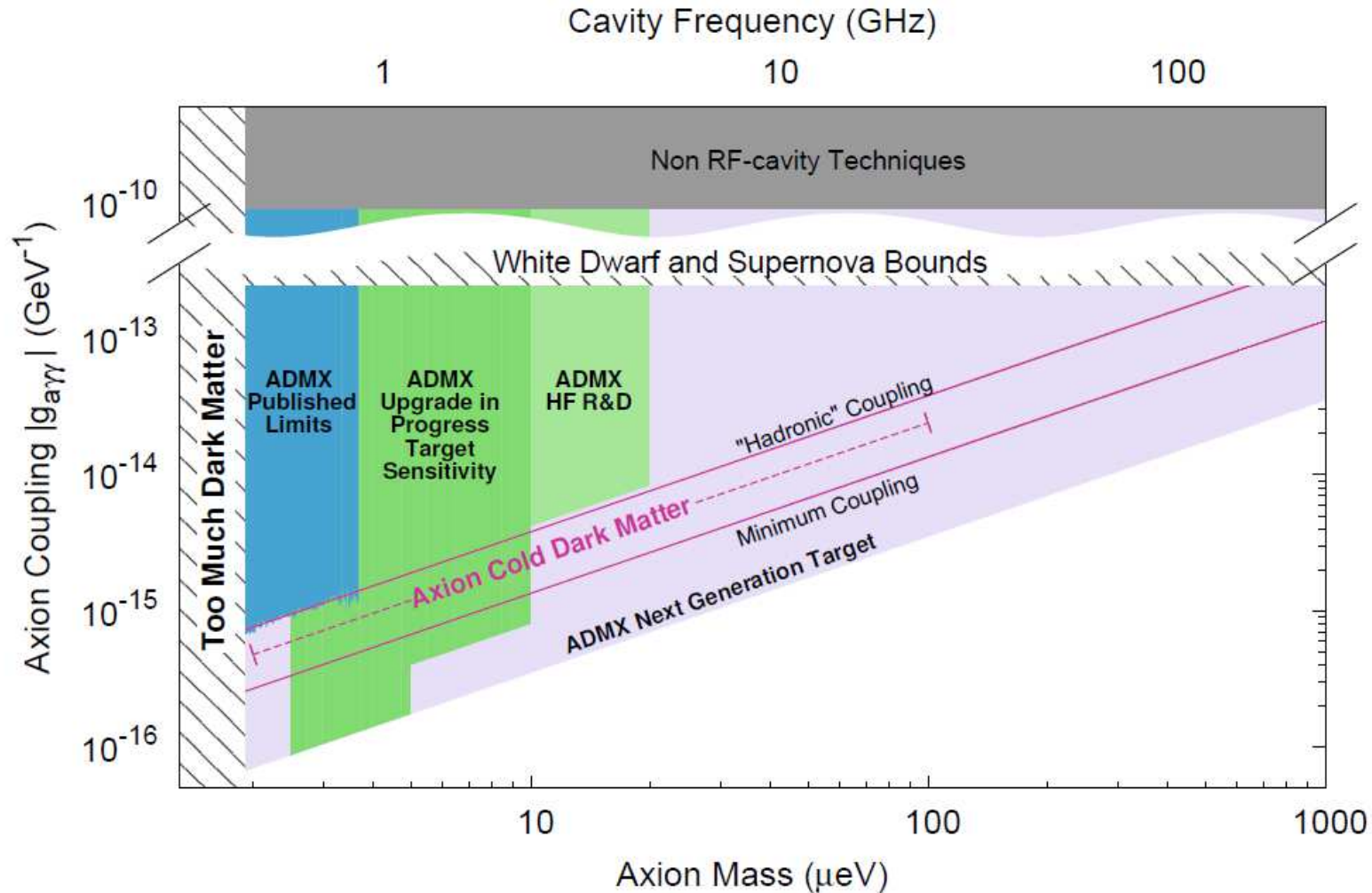


Figure 2. The search reach of the ADMX RF-cavity experiments over the next 3 years. The first decade of allowed axion mass will be explored at “definitive” sensitivity to QCD axions over the next year. The middle decade will be explored at over the following two years. These two decades are expected to encompass the mass of the dark matter axion.

Temporary Conclusions

暫定的な結論

- **Simple WIMP dark matter scenario is facing difficulties**
ダークマターは、単純なWIMPでは困難になりつつある。
- **Dark matter may consist of multiple speices**
ダークマターは、複数の種類が並存しているかもしれない。
Axion or Axion-like DM + WIMP or WIMP-like DM
- **Multiwave studies are essential for the future studies on DM**
これからの研究には、多波長解析が必須であろう

Backup

AMS-2 Detector

Transition Radiation Detector

Detect soft X-rays emitted when ultra relativistic charged particles experience big jump in index-of-refraction

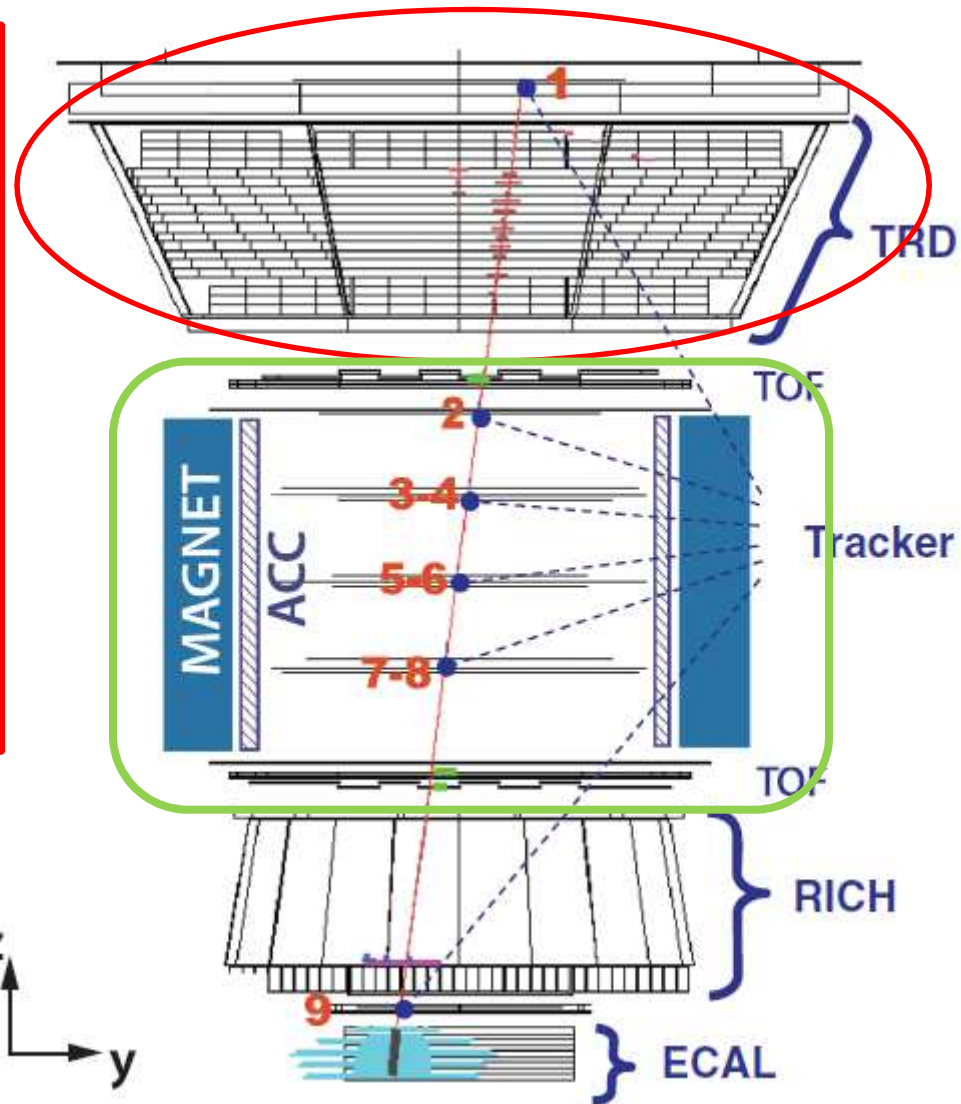
極めて光速に近い荷電粒子が屈折率が大きく違う境界を通過するときに出す、軟X線を検出する

Key component in separating electrons and protons
電子と陽子を分けるのに重要

Magnet 磁石

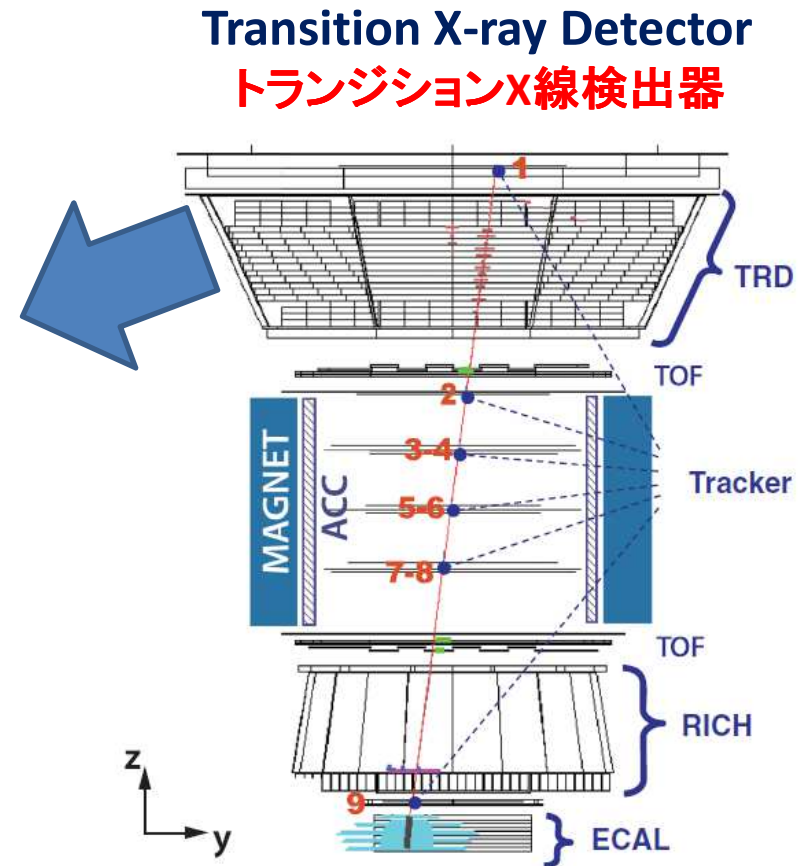
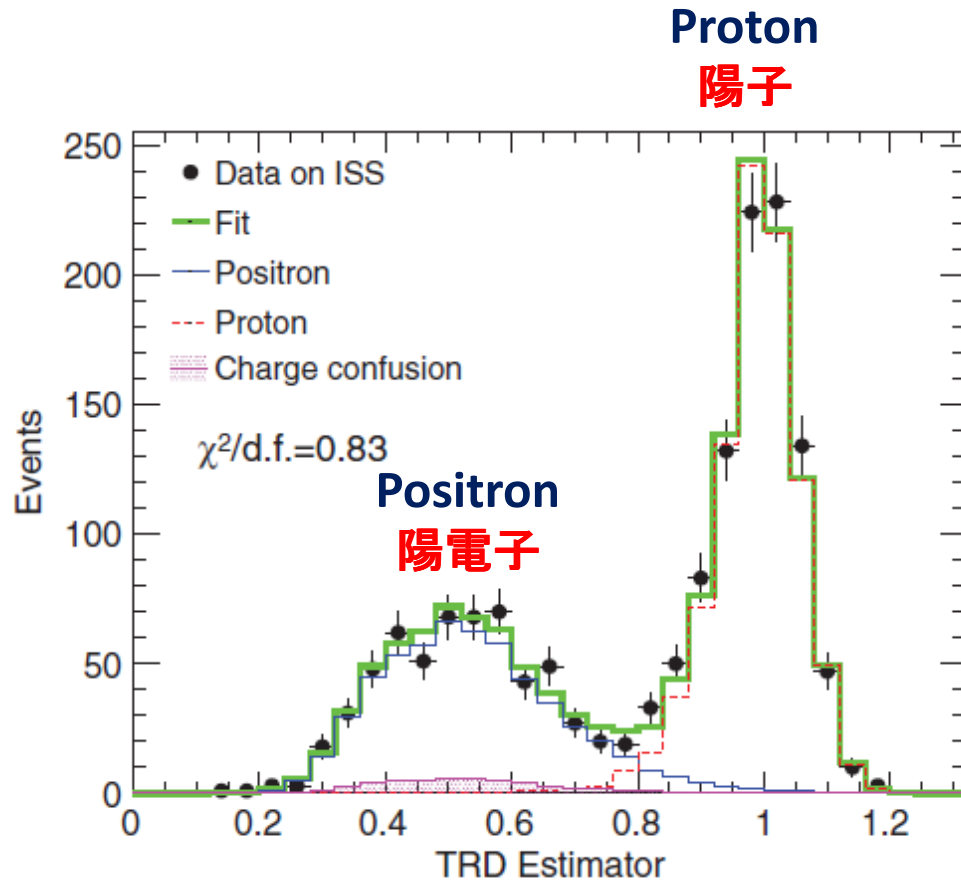
Measure momentum of charged particles

荷電粒子運動量(エネルギー)を測定



Important Characteristics: e⁺ proton separation

重要な検出器の性能:陽電子と陽子の分離



Fermi without TRD: Shower Trans Shape

TRDがないFermi衛星:シャワーの広がり

Red: e^+
Blue: proton

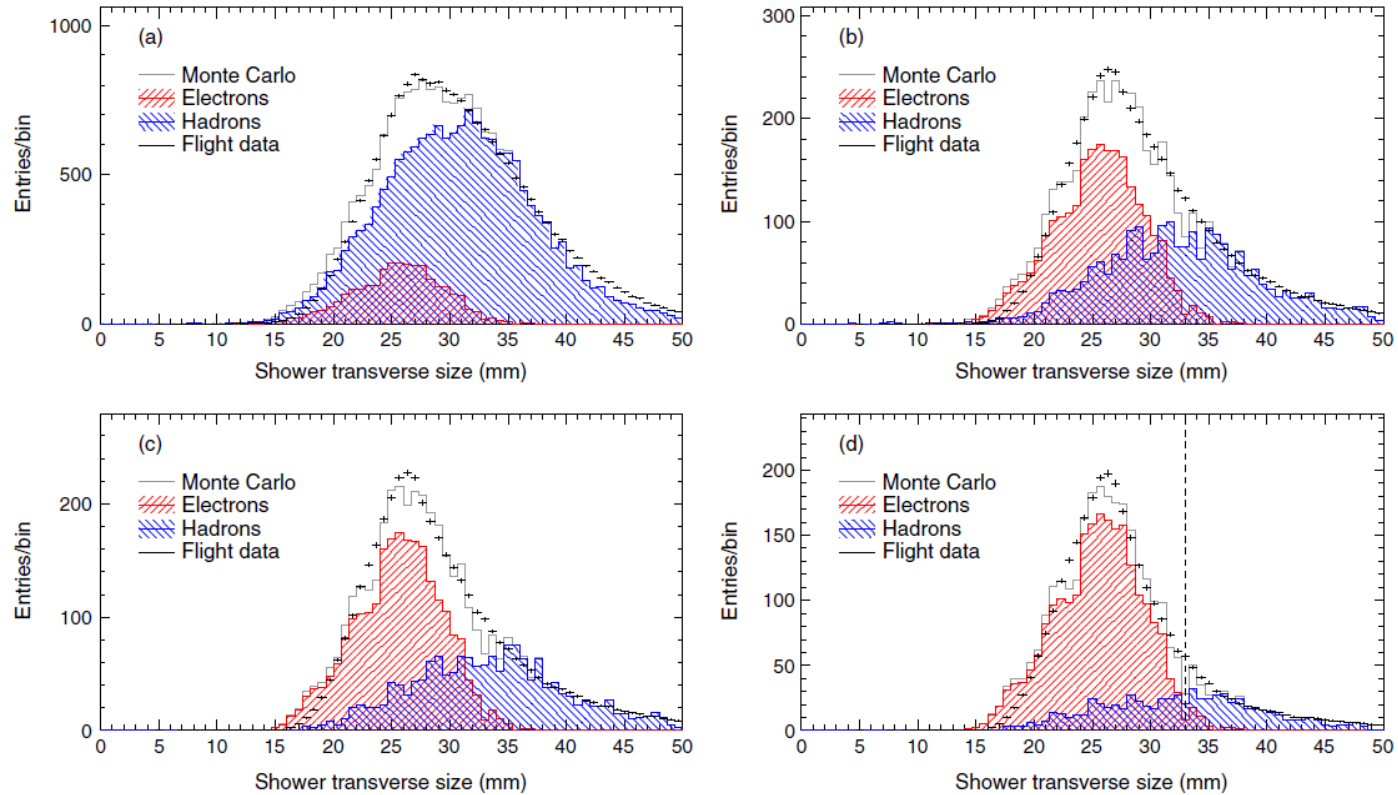


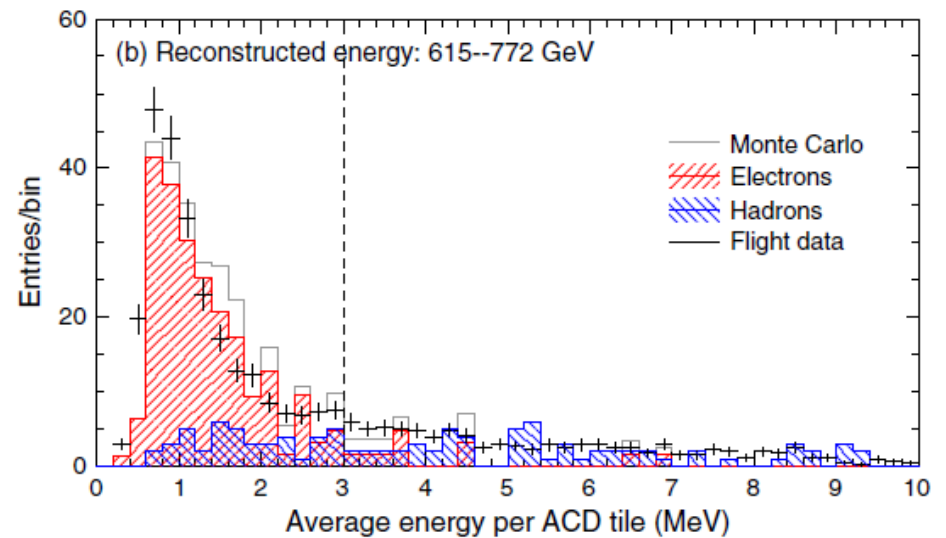
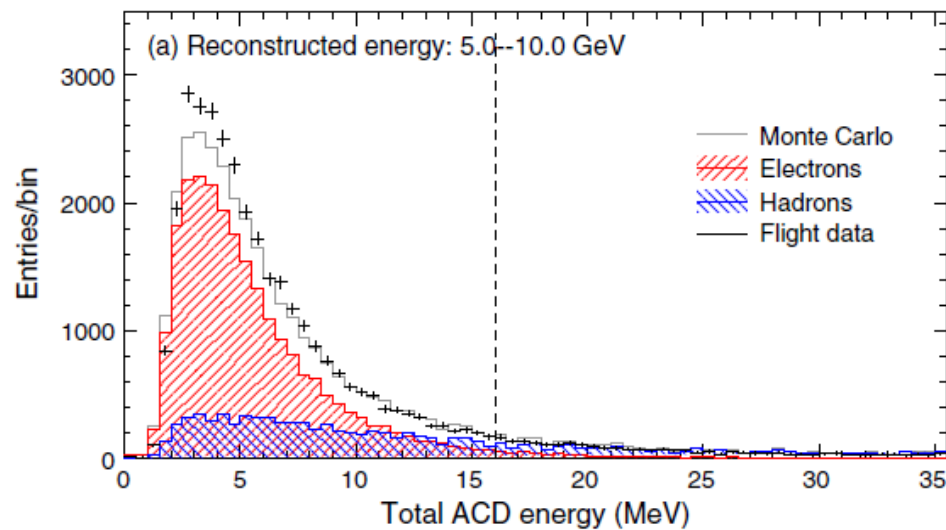
FIG. 5 (color online). Distribution of the shower transverse size in the calorimeter for the energy interval 133–210 GeV at different stages of the HE selection: (a) after the cuts on the calorimeter variables except the one on the transverse size itself, (b) adding the selection on the tracker, (c) on the ACD, and (d) on the probability that each event is an electron based on a classification tree analysis. The vertical dashed line in panel (d) represents the value of the cut on this variable. The Monte Carlo distribution (gray line) is the sum of both the electron (red histogram) and hadron (blue histogram) components. The simulations have poorer statistics (as reflected in larger bin-to-bin fluctuations) and are scaled to the flight data.

Fermi without TRD: Plastic Scinti Signal

TRDがないFermi衛星: シンチレータの信号

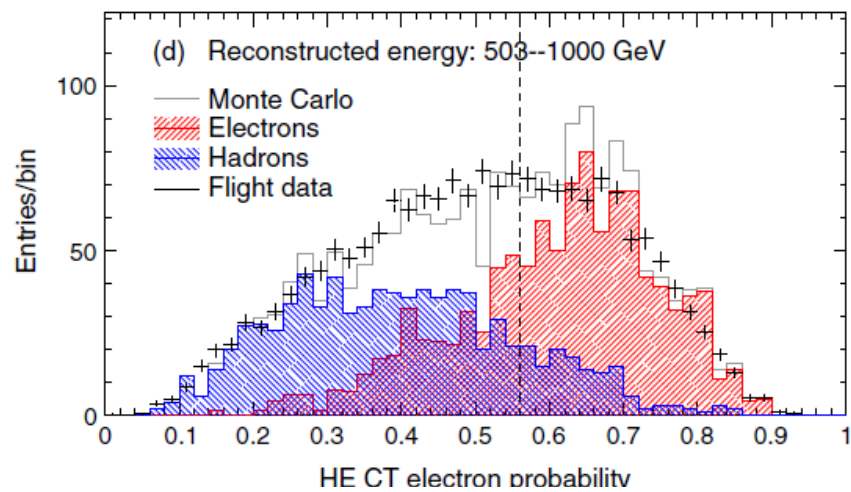
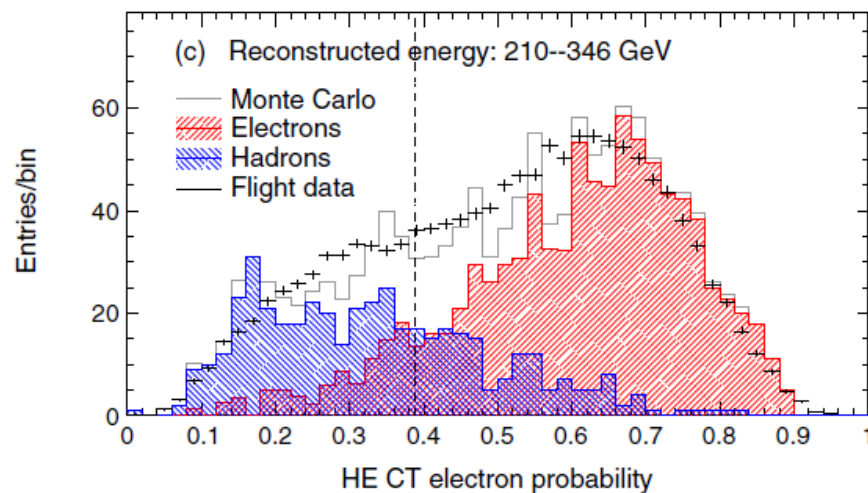
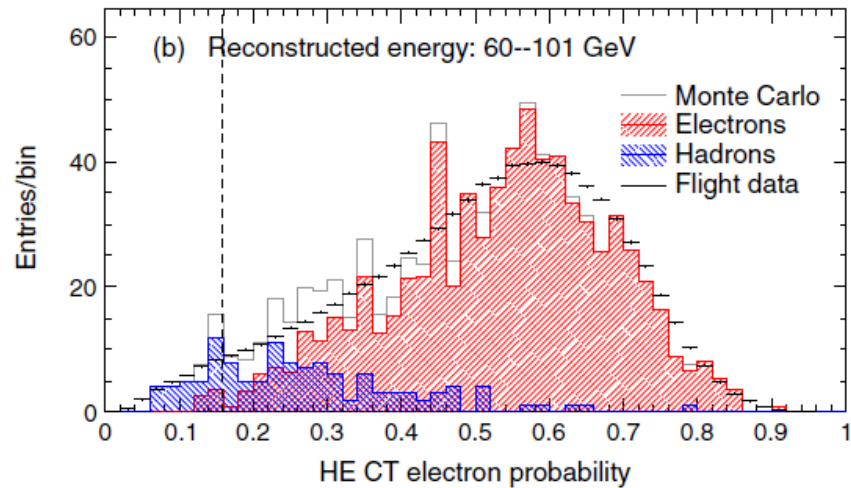
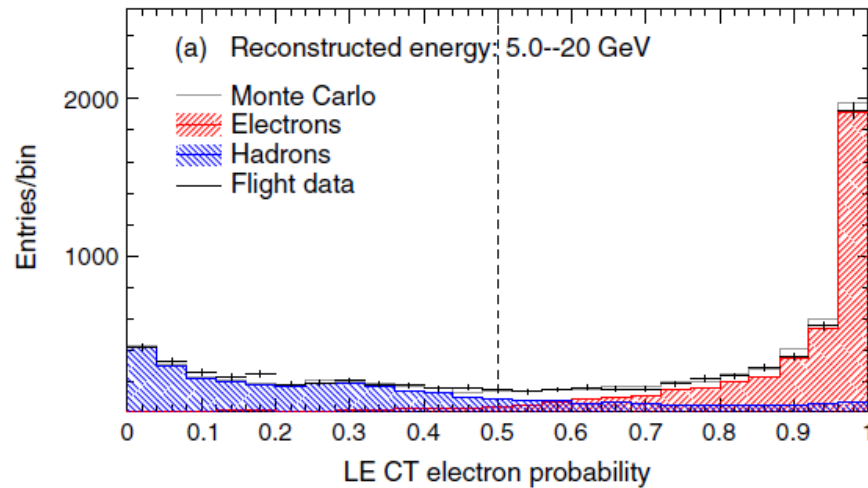
Red: e^+

Blue: proton

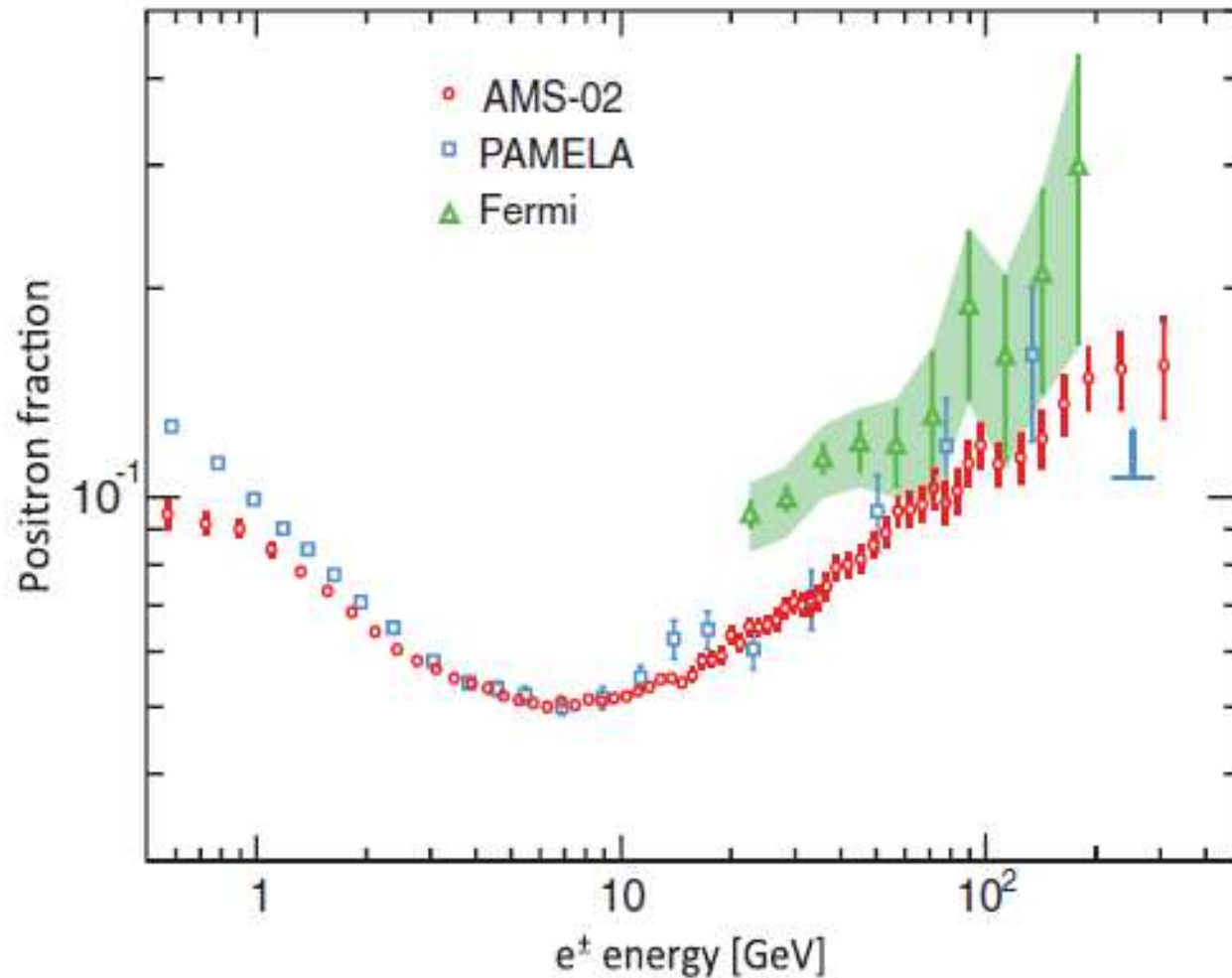


Fermi without TRD: Combination of two

TRDがないFermi衛星: 2つの組み合わせ



$e^+/(e^- + e^+)$ by AMS, PAMELA & Fermi



AMS-2 results

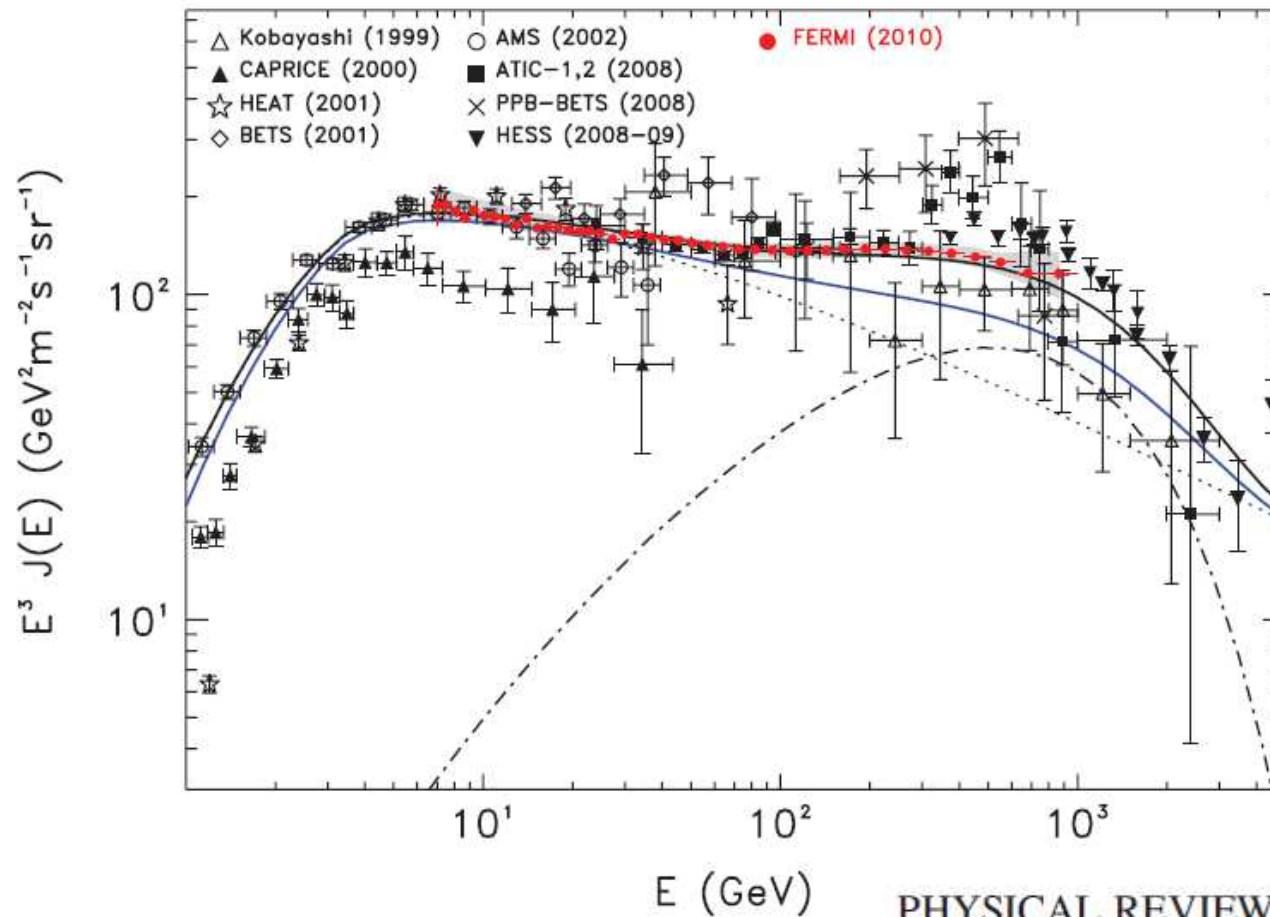
- Extends to $\sim 300\text{GeV}$
- Highest precision
- Agree with PAMELA
- 300GeVまで拡張
- 高精度
- PAMELAと合っている

Constraint in Interpreting Results No.1

結果を解釈する上での制約 No.1

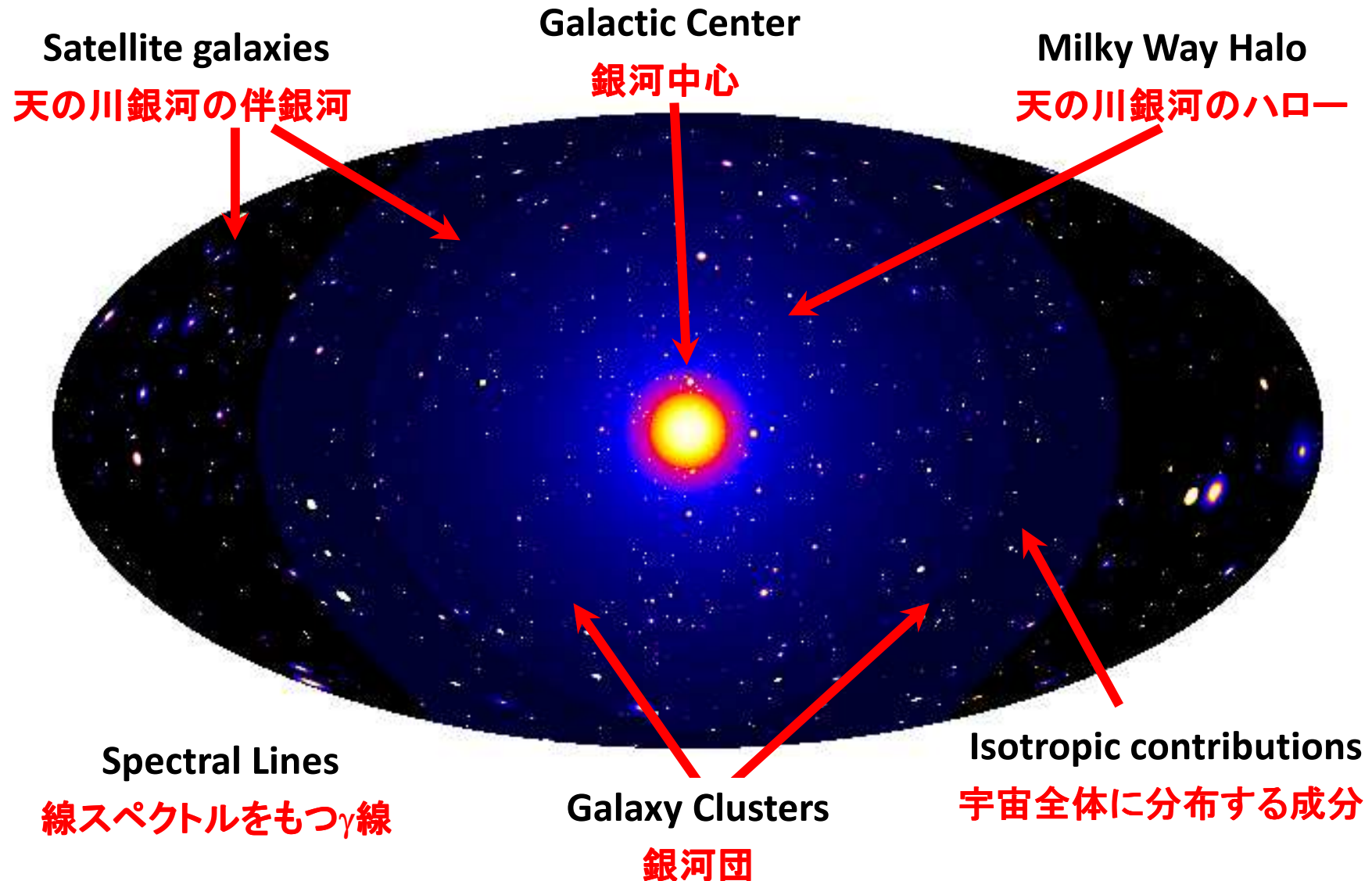
Flux and spectrum of (electrons + positrons)

電子+陽電子のフラックスとスペクトル



Constraints No.3: Fermi Obs in γ -ray

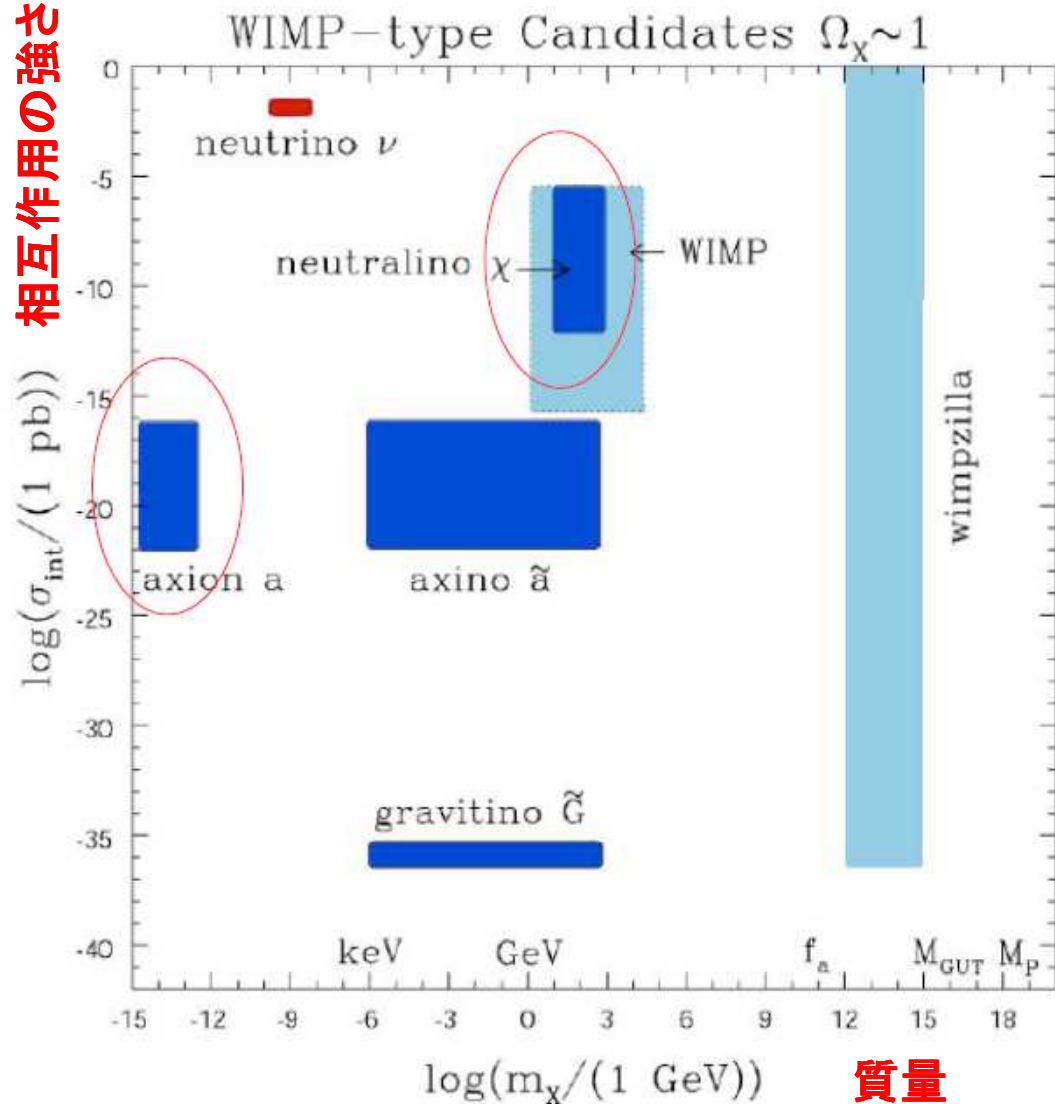
制約No.2: フェルミ衛星による γ 線観測



Theory Driven DM: WIMP is most popular

正当派理論に基づくDM: WIMPが一番人気

相互作用の強さ



- neutrino ν – hot DM
- neutralino χ
- “generic” WIMP
- axion a
- axino \tilde{a}
- gravitino \tilde{G}
- wimpzilla,...

There are many ad-hoc models

多くのDMモデルが「自由に」作られた

Many DM models have been tailored to explain specific “anomalies.”

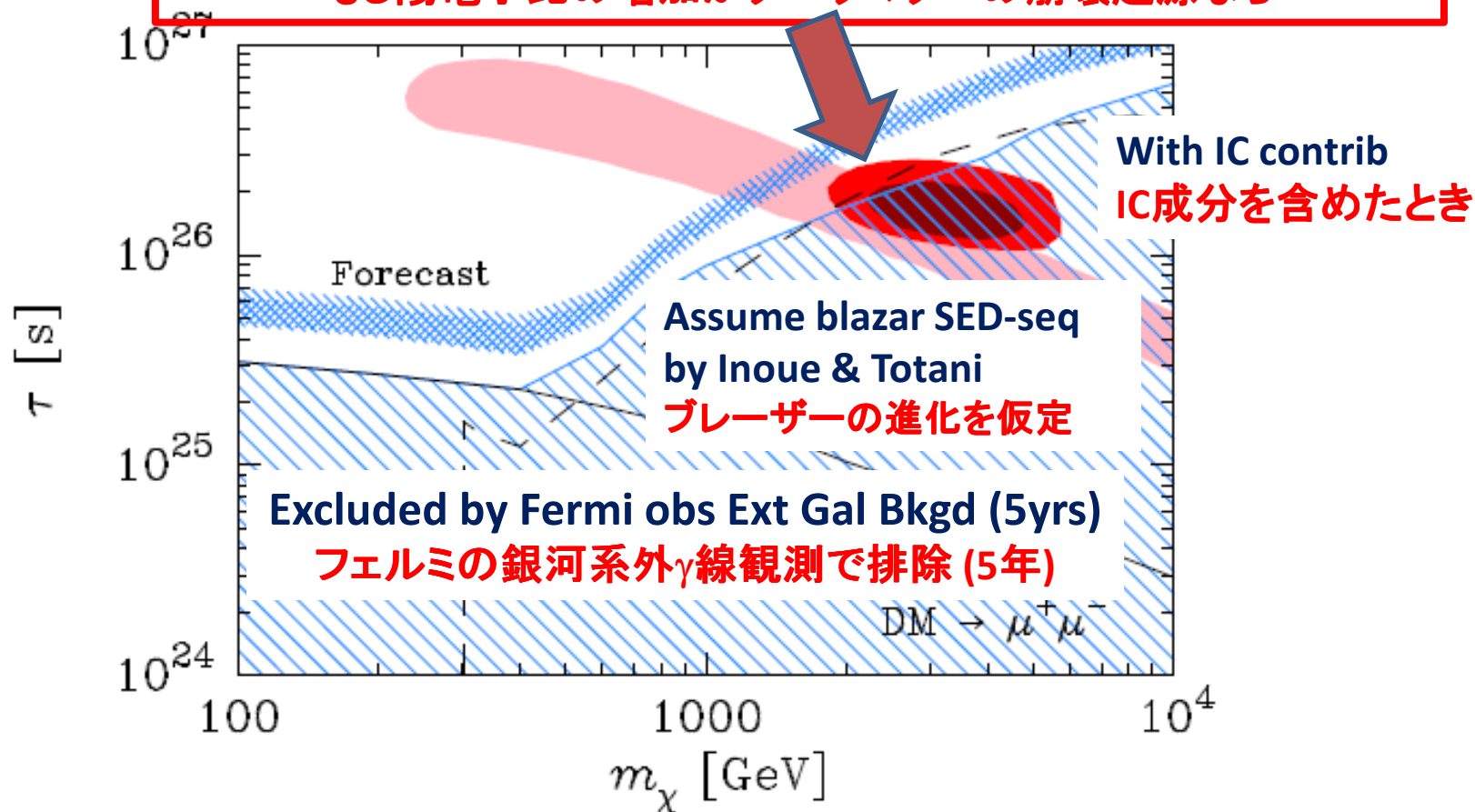
Next slides show constraints on PAMELA e^+/e^- motivated DM models

Fermi Constrains Dark Matter Decay Scenario

フェルミによる崩壊するダークマターへの制限

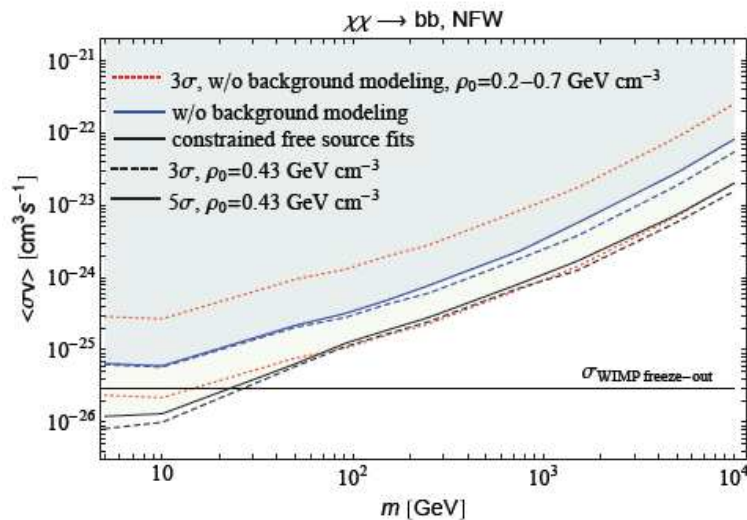
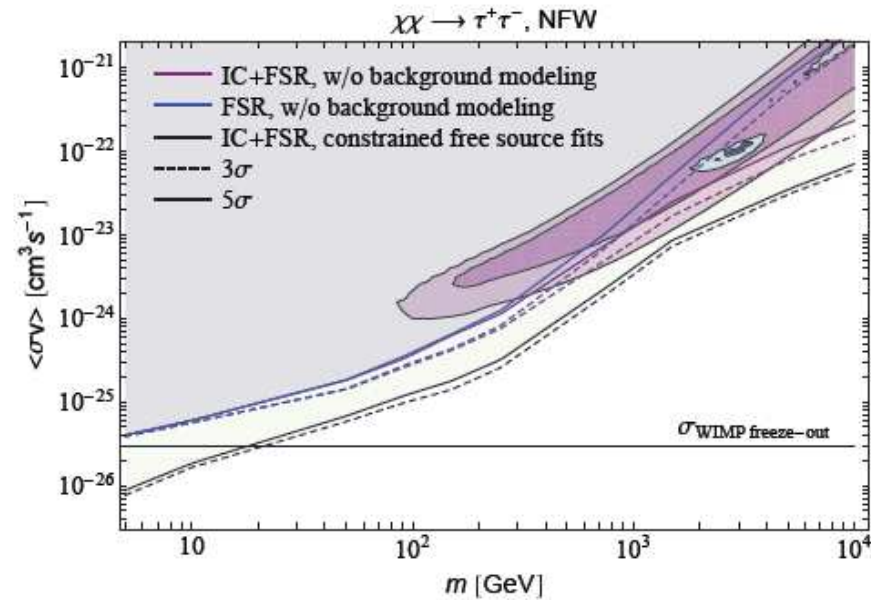
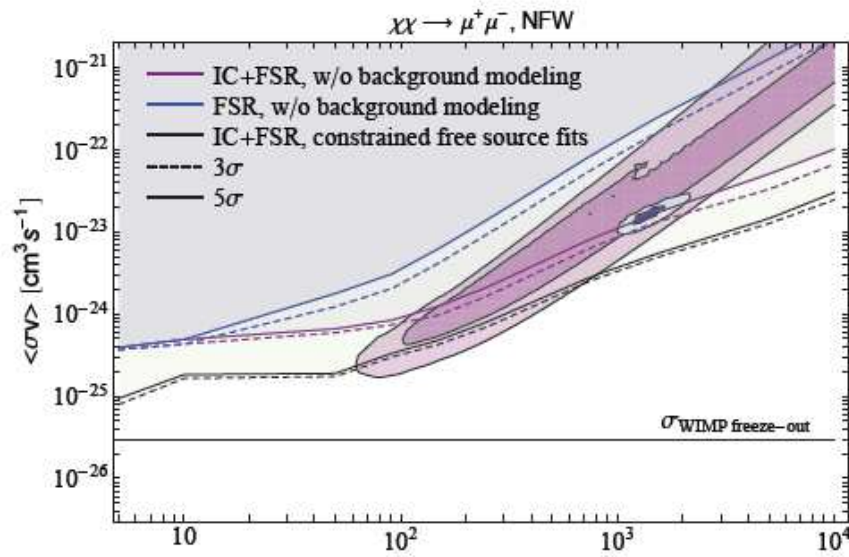
If rise in positron frac is due to DM decay (PAMELA+Fermi)

もし陽電子比の増加がダークマターの崩壊起源なら



Halo Obs: Constraints on e+/e--Based DM Models

銀河ハロー観測:陽電子比ベースのDMモデルを制限



In 1 year, Fermi data alone can exclude all leptophilic DM models.

フェルミは、一年以内にレプトンに崩壊するモデルを全て否定可能になる。

Similar constraints on decaying DM

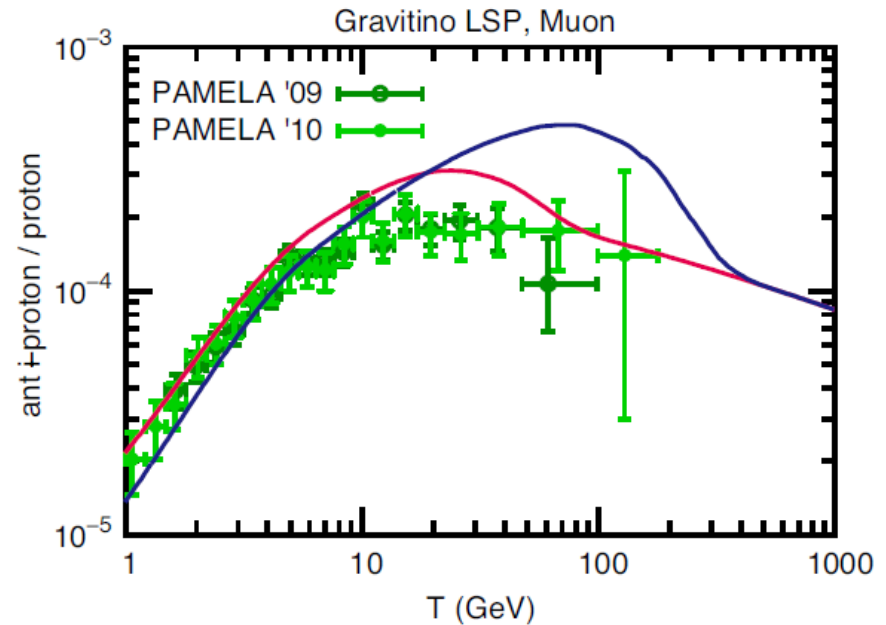
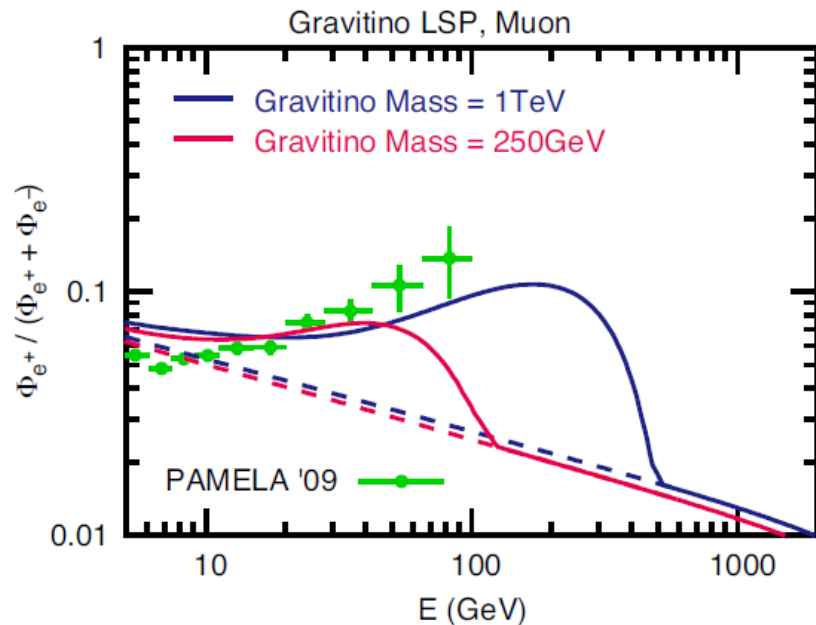
Surviving DM Scenario Theory: Example 1

生き延びているダークマター理論: 例1

Gravitino DM with $\mathcal{L}_{\text{RPV}} = B_{\text{RPV}}\tilde{L}_2H_d + \text{h.c.}$

- $\psi_\mu \rightarrow \gamma\nu_\mu, Z\nu_\mu, W_\mu, \text{ and } h\nu_\mu$
- \bar{p} production occurs

**Barely compatible with current data:
AMS-2 anti-p results may wipe-out
completely**



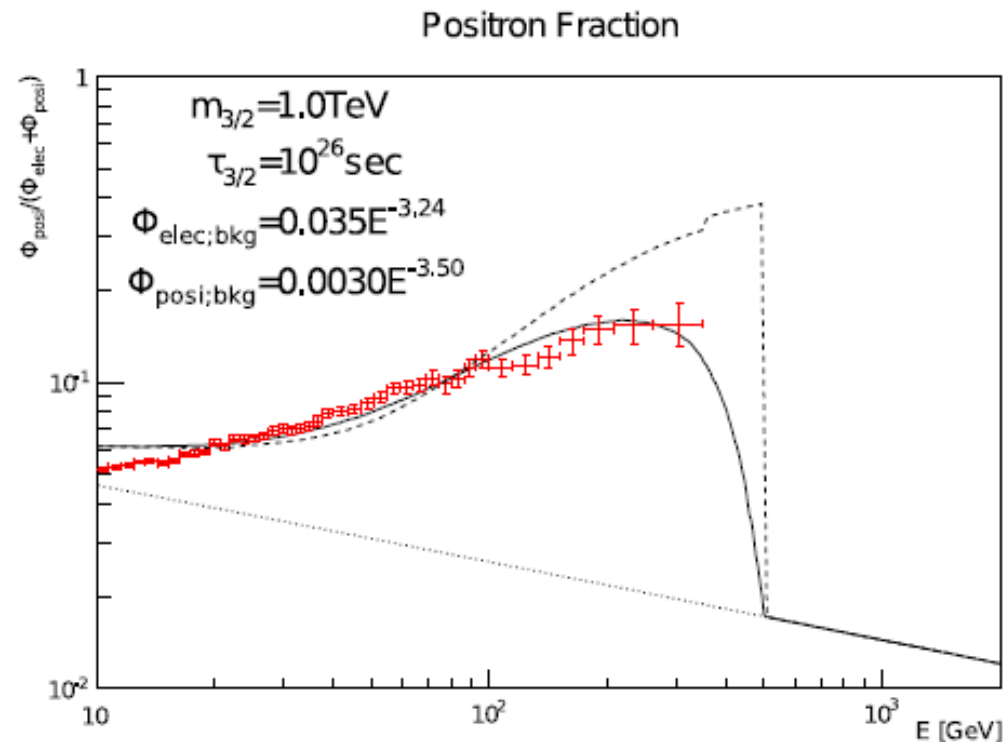
[Ishiwata, Matsumoto & TM ('10)]

DM Scenario Theory: Example 2

ダークマター起源の理論: 例2

Masahiro Ibe^(a,b), Sho Iwamoto^(b), Shigeki Matsumoto^(b),
Takeo Moroi^(c,b) and Norimi Yokozaki^(b)

arXiv:1304.1483v1



R-parity violation decay from very heavy Gravitino.

Predictions on anti-proton and other particle fluxes not known to TK

Dark Matter Scenario: Fitting by Cholis & Hooper

ダークマター起源: Cholis & Hooper のフィット

Ilias Cholis^{1,*} and Dan Hooper^{1,2,†}

arXiv:1304.1840v1 [astro-ph.HE] 6 Apr 2013

Fine tuning required: Very massive WIMP (1.6-3TeV) decaying to 4μ or $2\mu 2e$
極めて重いDMが特殊なチャンネルに崩壊すると仮定すると説明可能

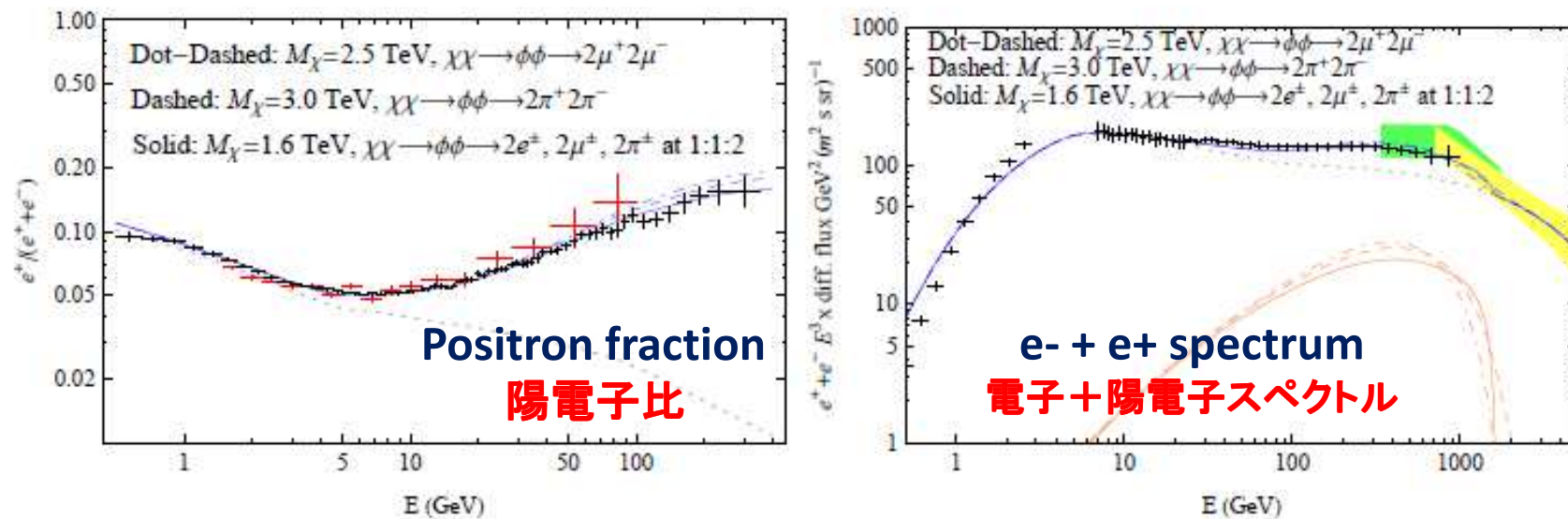
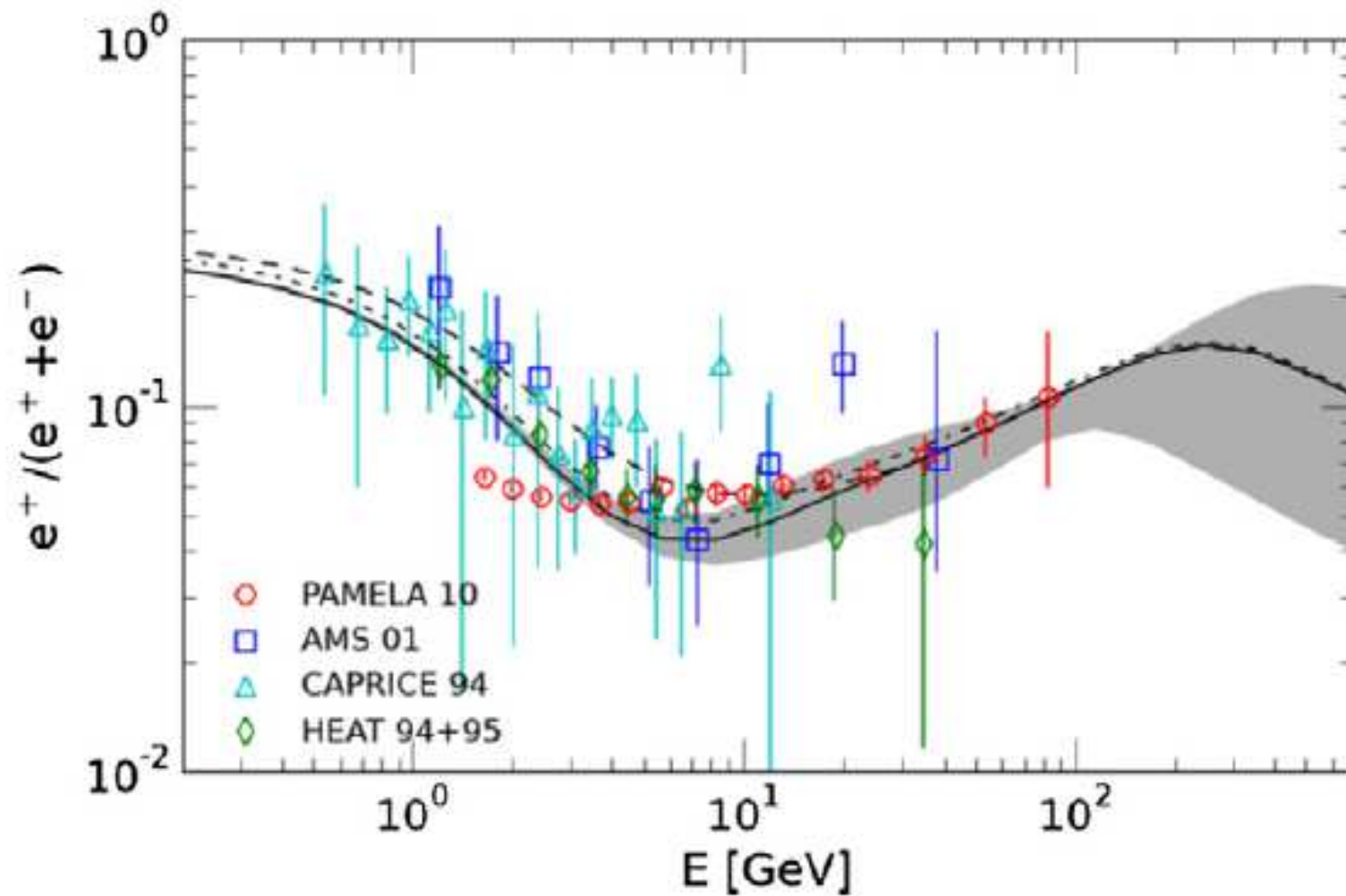


FIG. 6: The same as in Figs. 1, 2, 4 and 5 but for a diffusion zone half-width of $L = 8$ kpc, and for broken power-law spectrum of electrons injected from cosmic ray sources ($dN_{e^-}/dE_{e^-} \propto E_{e^-}^{-2.65}$ below 100 GeV and $dN_{e^-}/dE_{e^-} \propto E_{e^-}^{-2.3}$ above 100 GeV). The cross sections are the same as given in the caption of Fig. 5. With this cosmic ray background, the dark matter models shown can simultaneously accommodate the measurements of the cosmic ray positron fraction and the overall leptonic spectrum.

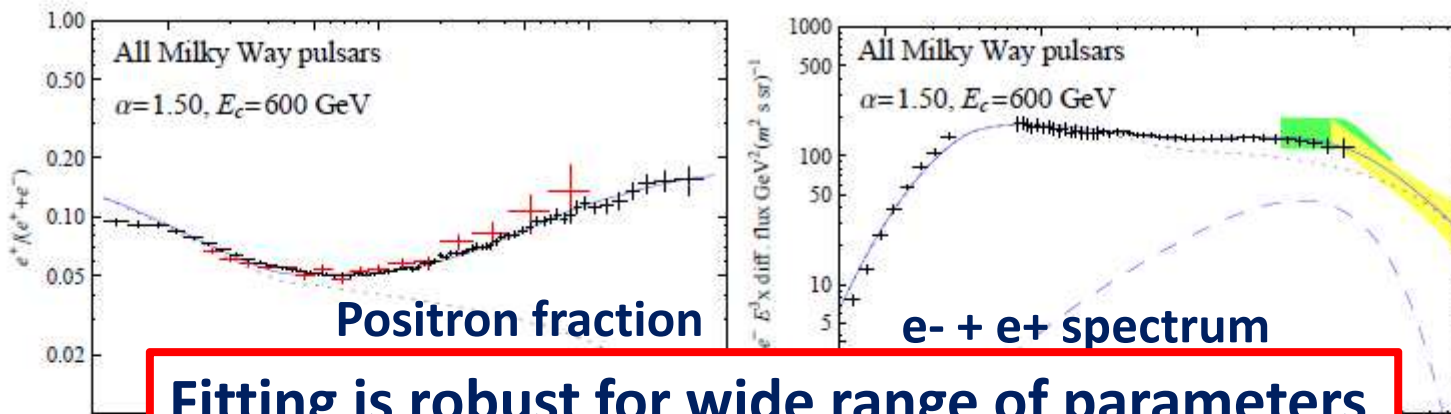
Pulsar Scenario: Lee, Kamae et al 2011

パルサー起源：李・釜江他

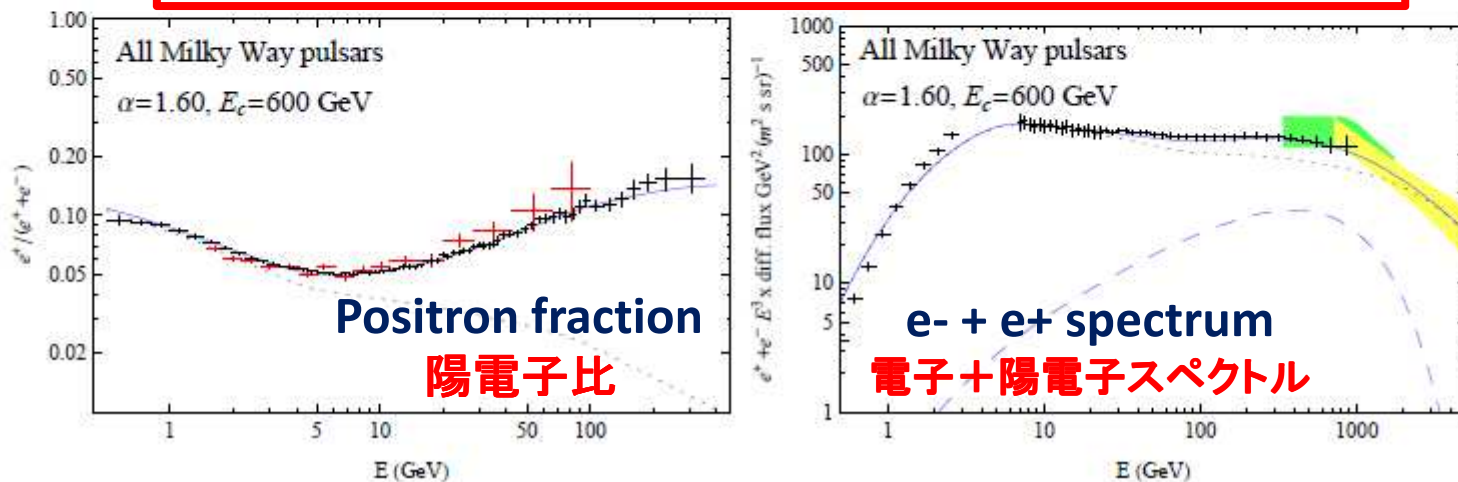


Pulsar Scenario by Cholis & Hooper

パルサー起源: Cholis & Hooper



幅広いパラメーターでフィット可能



陽電子比

電子+陽電子スペクトル