

LHCの開く新たな宇宙物理

松本 重貴

(高エネルギー加速器研究機構)

I. イントロダクション

Connection

素粒子物理学

暗黒物質

宇宙物理学

1. 全質量の22%、構造形成の種
2. 標準模型を超える物理の証拠

LHC実験に期待される事:

暗黒物質の正体を解明し、その性質を調べる！！

暗黒物質の正体が解明され、その性質が明らかになった際の、宇宙論及び天文学に対する影響

II. TeVの物理と暗黒物質

何故LHCに暗黒物質の正体解明を期待するのか？



暗黒物質は標準模型を超える物理、特にTeVスケールの物理と深く関っている可能性大！！

具体例

1. 超対称性 シナリオ (MSSM)
2. リトルヒッグス シナリオ (LHT)
3. TeVスケール余剰次元 シナリオ (UED)
4.

1. 超対称 シナリオ

ボソンとフェルミオンの間の対称性

Quark	\leftrightarrow	Squark
Lepton	\leftrightarrow	Slepton
Gauge	\leftrightarrow	Gaugino
Higgs	\leftrightarrow	Higgsino
(R-even)		(R-odd)

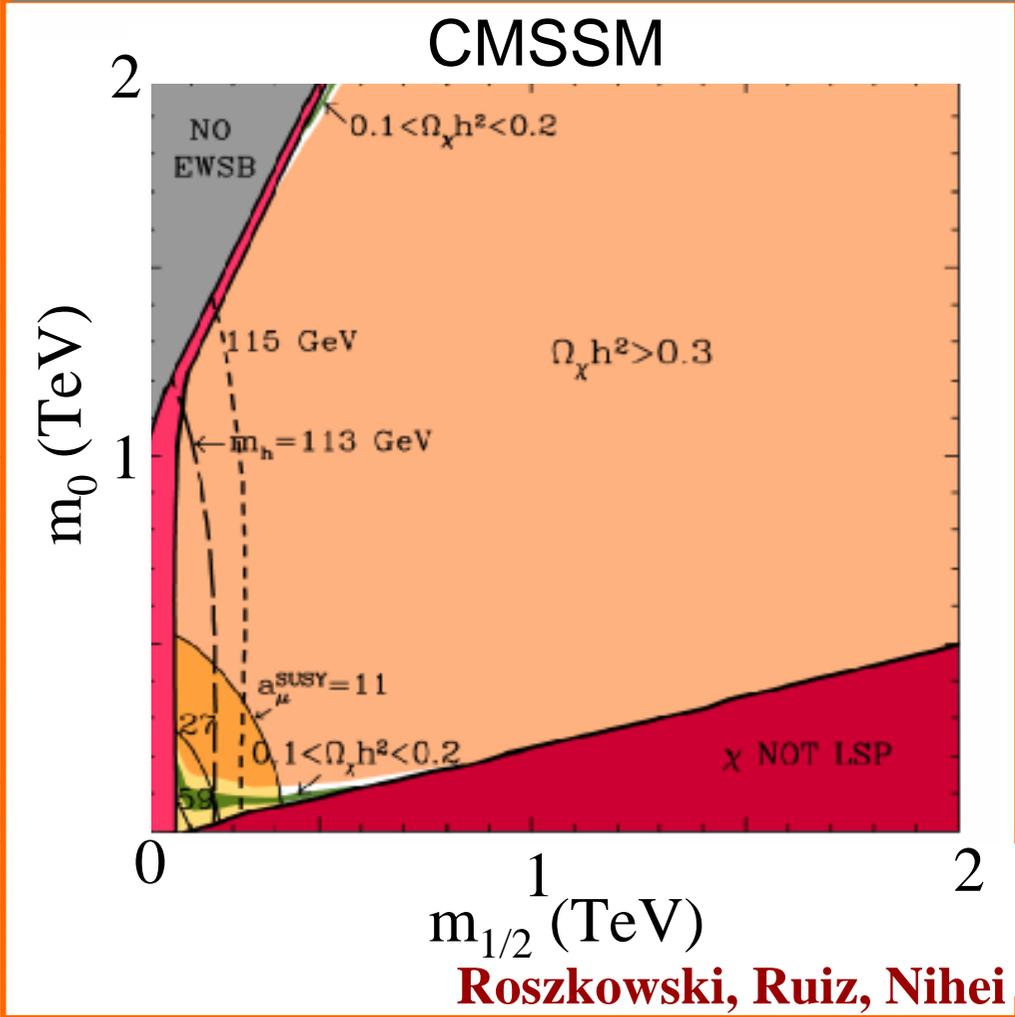
Motivation

- ヒッグス質量に対する安定性
- 大統一理論

陽子崩壊を抑制 → **R-parity**
 ↓
 最も軽い超対称性パートナー (LSP) は安定 (暗黒物質の候補)

Neutralino 暗黒物質

$$\tilde{\chi}^0 = Z_B \tilde{B} + Z_W \tilde{W} + Z_{Hu} \tilde{H}_u + Z_{Hd} \tilde{H}_d$$



1. 超対称 シナリオ

ボソンとフェルミオンの間の対称性

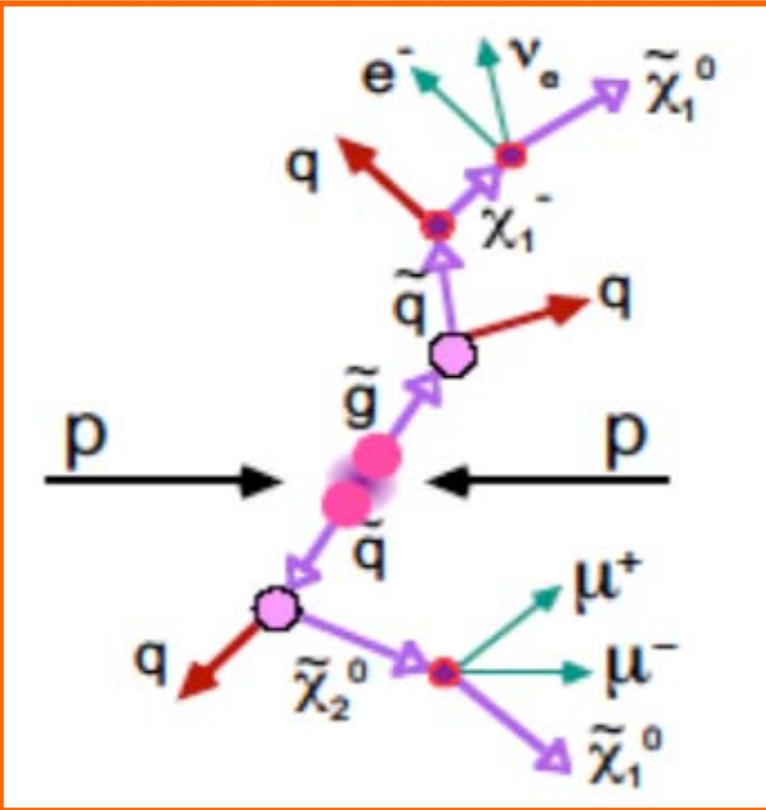
Quark	\leftrightarrow	Squark
Lepton	\leftrightarrow	Slepton
Gauge	\leftrightarrow	Gaugino
Higgs	\leftrightarrow	Higgsino
(R-even)		(R-odd)

Motivation

- ヒッグス質量に対する安定性
- 大統一理論

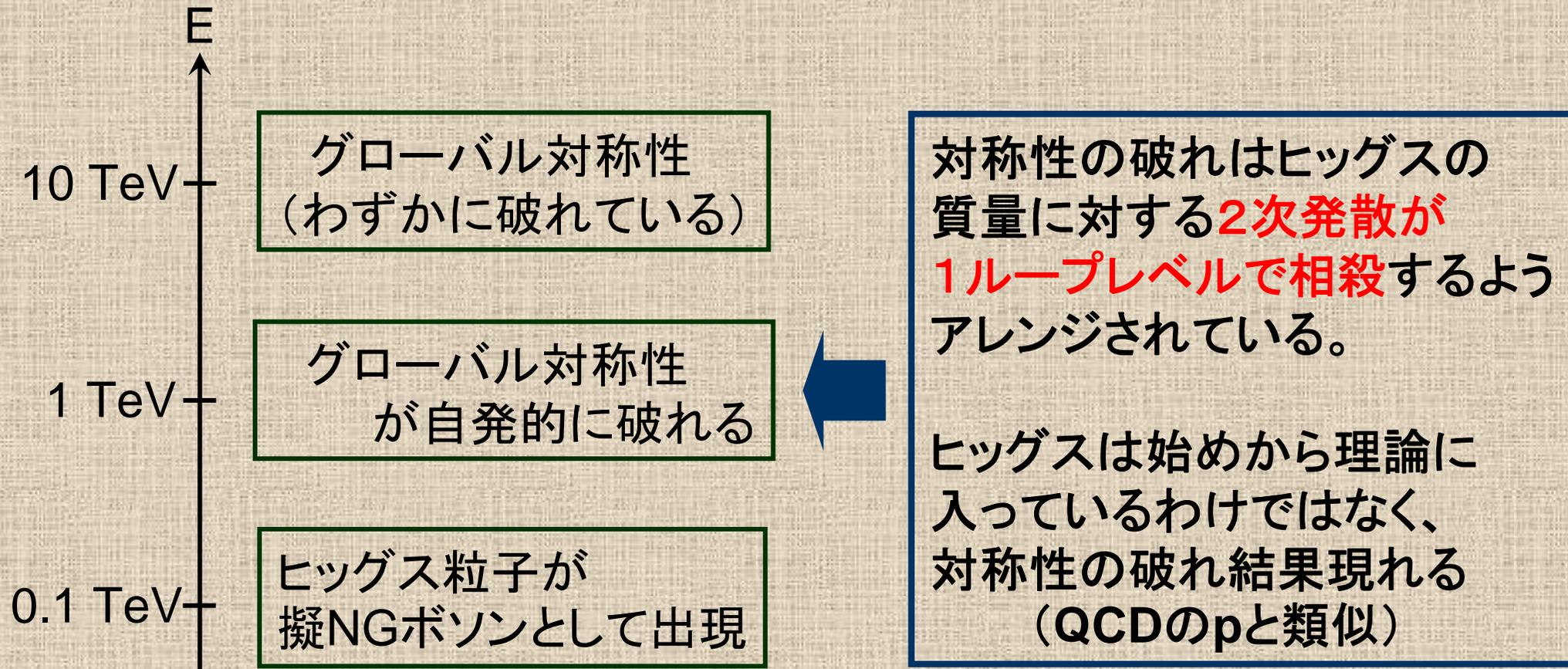
陽子崩壊を抑制 → **R-parity**
 ↓
 最も軽い超対称性パートナー
 (LSP)は安定(暗黒物質の候補)

LHCにおけるシグナル



Missing Energy
 を伴うカスケード崩壊

2. リトルヒッグス シナリオ



対称性の破れのアレンジの為軽いヒッグス(リトルヒッグス)を予言

2. リトルヒッグス シナリオ

グローバル対称性に付随したパートナー達

Gauge \leftrightarrow Heavy Gauge
(但し gluon 以外)

Higgs \leftrightarrow Triplet Higgs

Top quark \leftrightarrow T-odd top



Top partner \leftrightarrow T-odd Top partner
(T-even) (T-odd)

LEPからの制限 \rightarrow T-parity

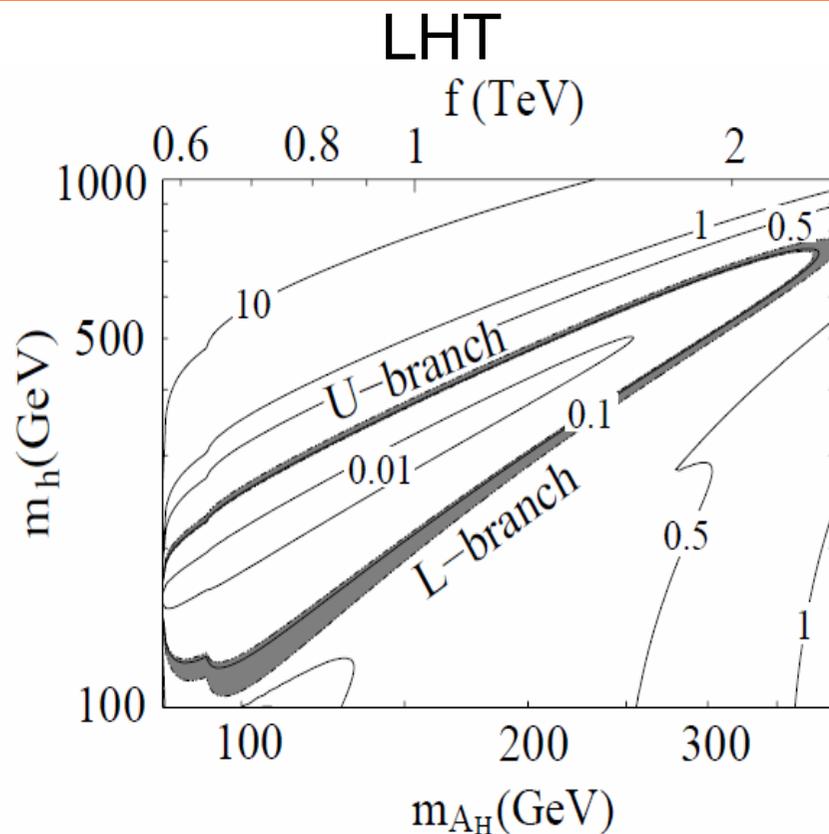


最も軽いTパートナー(LTP)
は安定(暗黒物質の候補)

\rightarrow 26日(月) Asano-san's talk

Heavy Photon 暗黒物質

$$A_H = Z_B B_H + Z_W W_{3H}$$



Asano, S.M, N.Okada, Y.Okada

2. リトルヒッグス シナリオ

グローバル対称性に付随したパートナー達

Gauge \leftrightarrow Heavy Gauge
(但し gluon 以外)

Higgs \leftrightarrow Triplet Higgs

Top quark \leftrightarrow T-odd top



Top partner \leftrightarrow T-odd Top partner
(T-even) (T-odd)

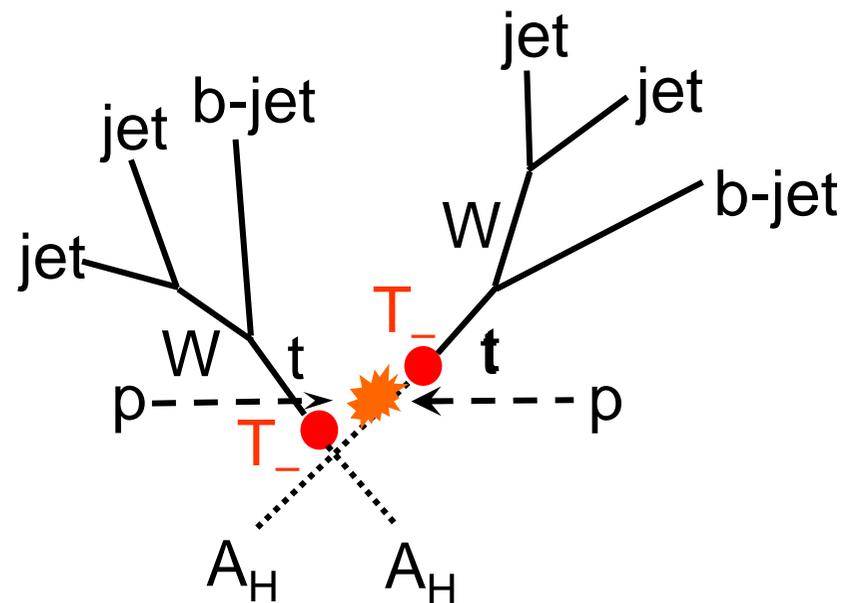
LEPからの制限 \rightarrow T-parity



最も軽いTパートナー(LTP)
は安定(暗黒物質の候補)

\rightarrow 26日(月) Asano-san's talk

LHCにおけるシグナル

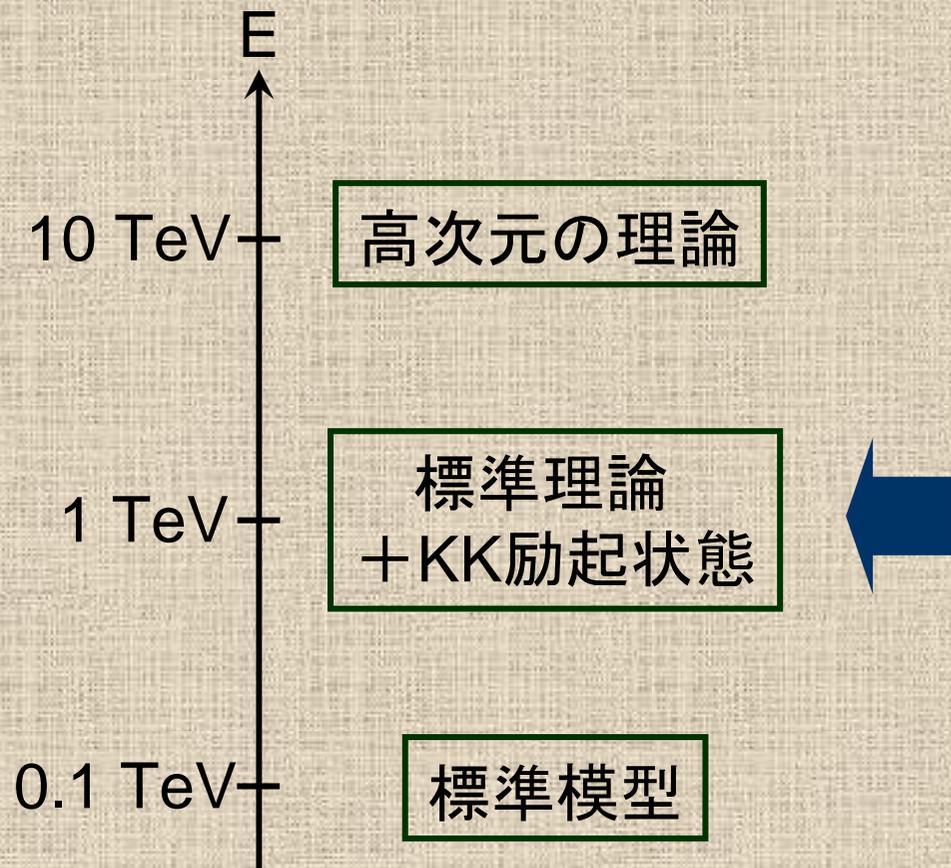


S.M, D.Nomura, M.M.Nojiri

Missing momentumを伴う
トップクォーク対生成

\rightarrow 26日(月) Nomura-san's talk

3. TeVスケール余剰次元シナリオ



余剰次元は**TeVスケールでコンパクト化**されている。

余剰次元の効果は、標準模型の粒子達に付随する**カルツァクライン(KK)励起状態**として観測

新しい物理のパラメータとして導入されるパラメータが**少ない**。
(5 dim UED の場合、 $1/R$ のみ)

暗黒物質の安定性が、**余剰次元方向の運動量保存則**により保障

3. TeVスケール余剰次元シナリオ

Quark	\leftrightarrow	n-th KK quark
Lepton	\leftrightarrow	n-th KK lepton
Gauge	\leftrightarrow	n-th KK gaugino
Higgs	\leftrightarrow	n-th KK Higgs

(KK-even) (KK-odd for odd n
KK-even for even n)

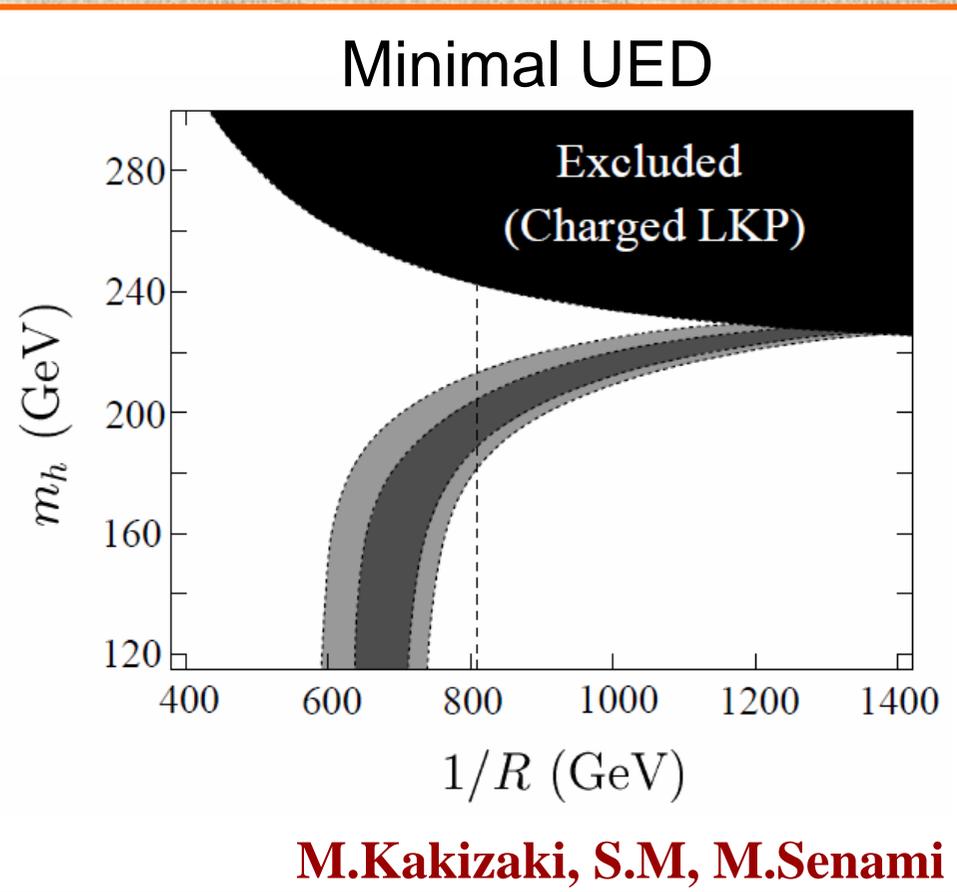
5次元方向の運動量保存則
+コンパクト化→KK-parity



最も軽い1st KK 粒子 (LKP)
は安定 (暗黒物質の候補)

1st KK Photon 暗黒物質

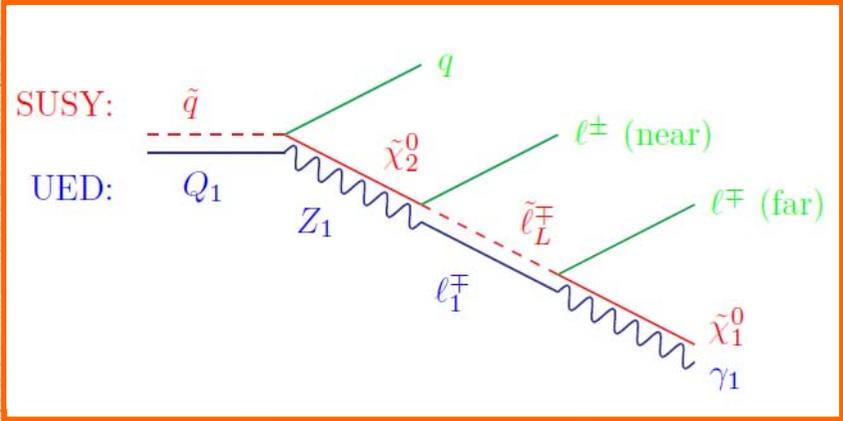
$$A^{(1)} = Z_B B^{(1)} + Z_W W_3^{(1)}$$



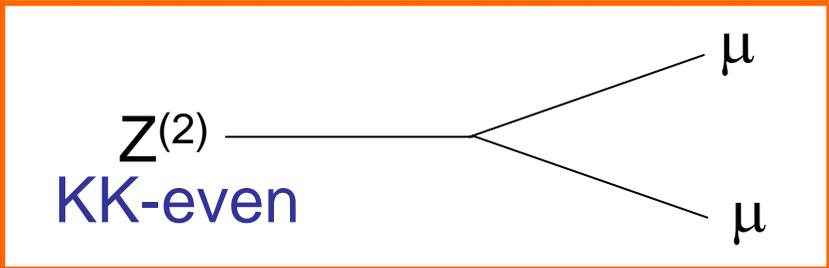
3. TeVスケール余剰次元シナリオ

Quark	\leftrightarrow	n-th KK quark
Lepton	\leftrightarrow	n-th KK lepton
Gauge	\leftrightarrow	n-th KK gaugino
Higgs	\leftrightarrow	n-th KK Higgs
(KK-even)		(KK-odd for odd n KK-even for even n)

LHCにおけるシグナル



Missing Energy
を伴うカスケード崩壊
(SUSY と酷似)

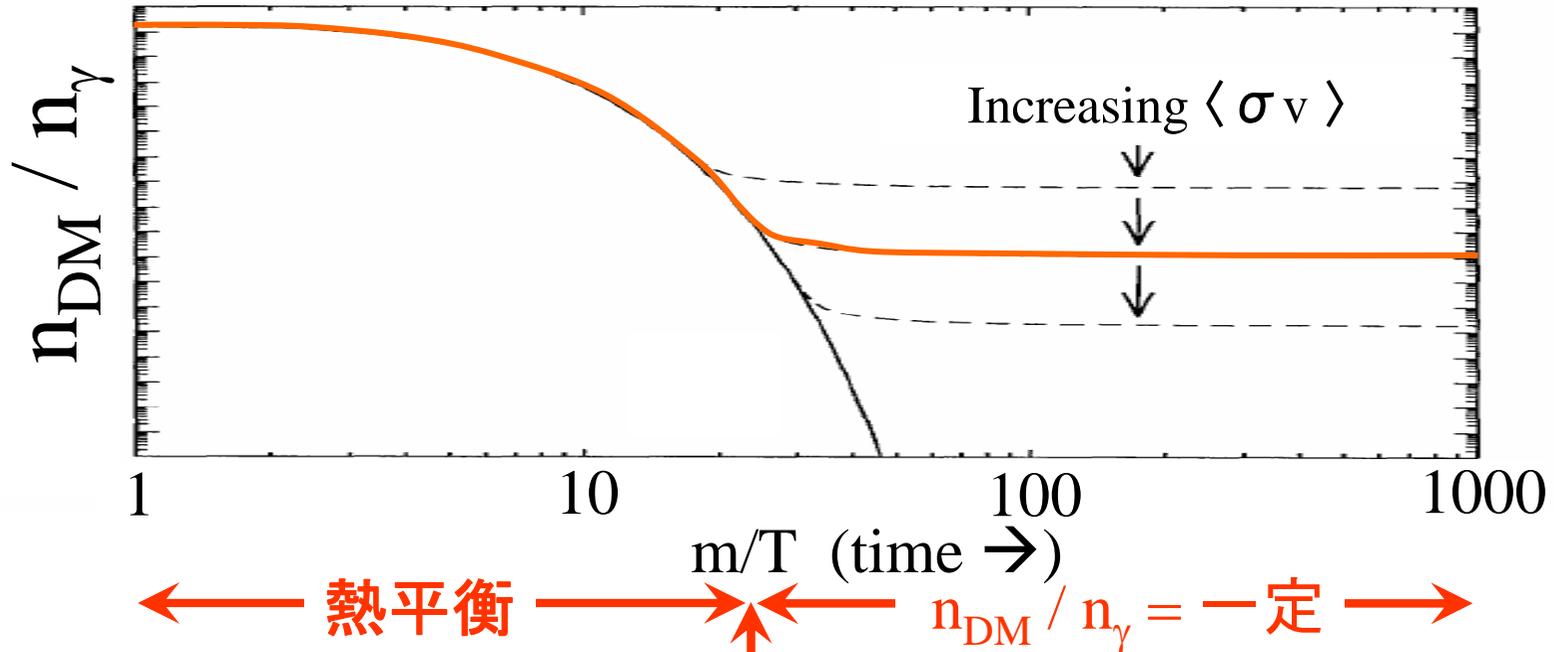


2nd KK 粒子生成
(Z'-search と基本的に同じ)

5次元方向の運動量保存則
+コンパクト化→KK-parity
↓
最も軽い1st KK 粒子 (LKP)
は安定(暗黒物質の候補)

III. 宇宙論への影響

初期宇宙における暗黒物質の振る舞い



対消滅反応の凍結
($H = \Gamma = \langle \sigma v \rangle n_{DM}$)

暗黒物質の対消滅断面積が現在の宇宙における暗黒物質の残存量(暗黒物質の質量密度)を決定

LHC実験結果

暗黒物質の
対消滅断面積
を評価

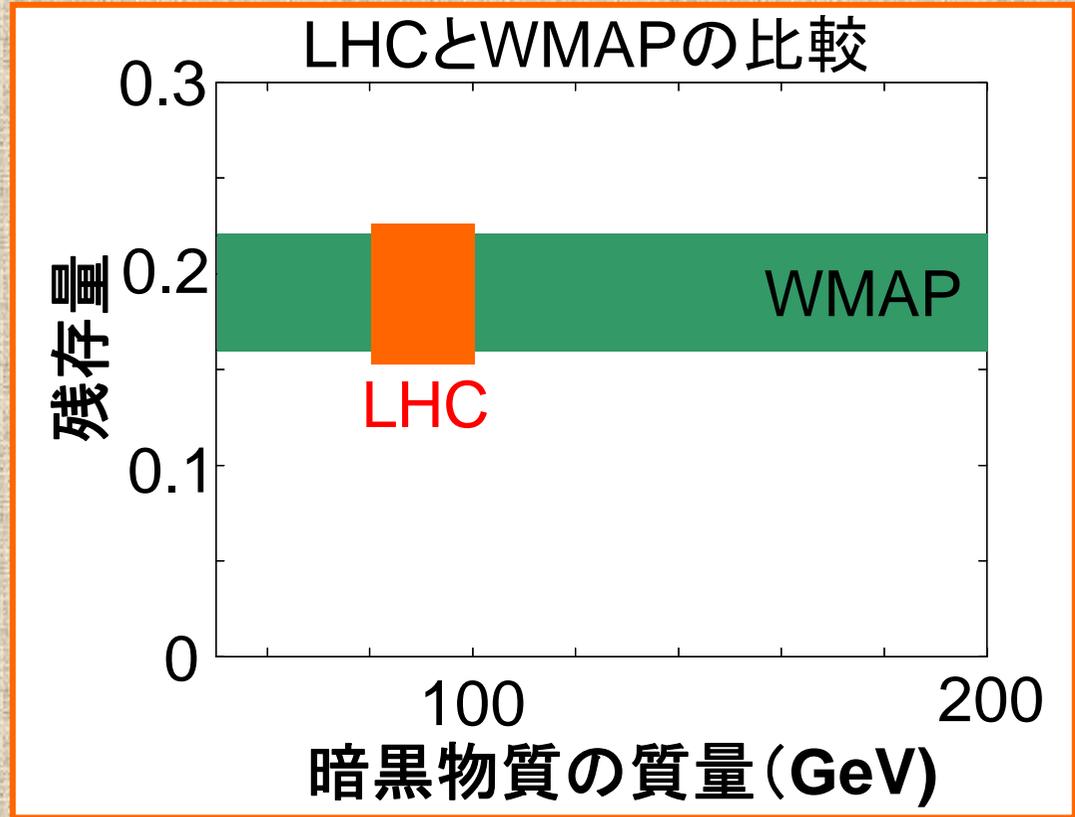
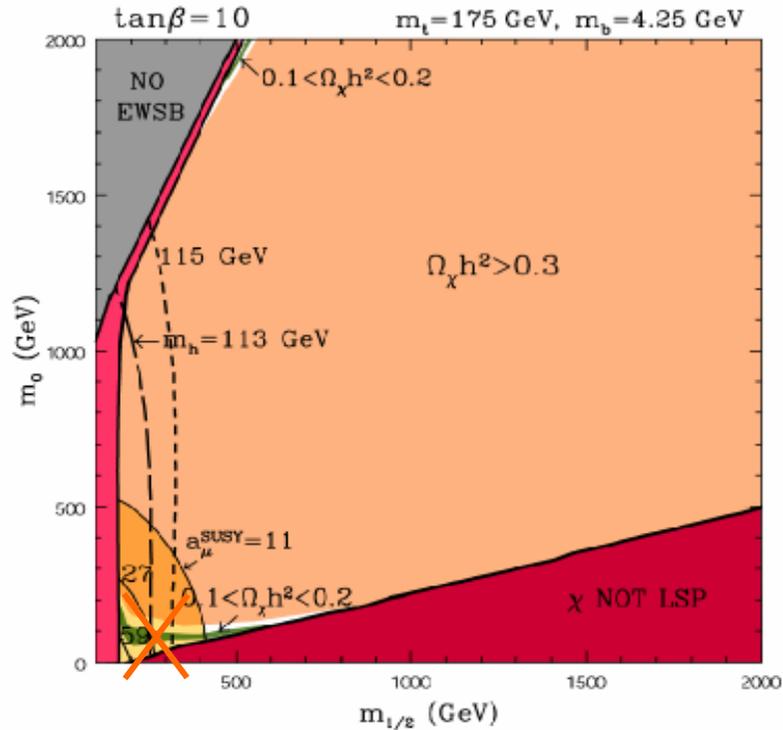
現在の宇宙に
おける暗黒物質
残存量を予言

⇕比較

宇宙背景放射
の揺らぎ観測
WMAP, Planck

比較プロセスのデモンストレーション (MSSM)

サンプルポイント

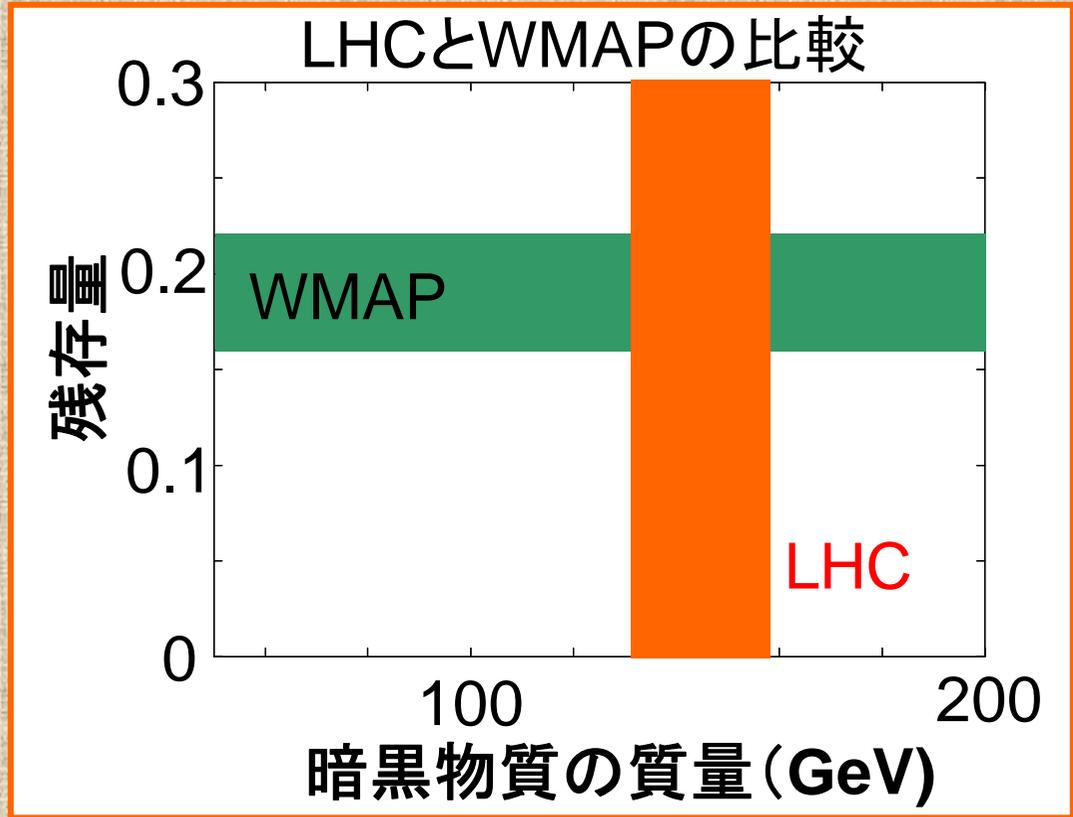
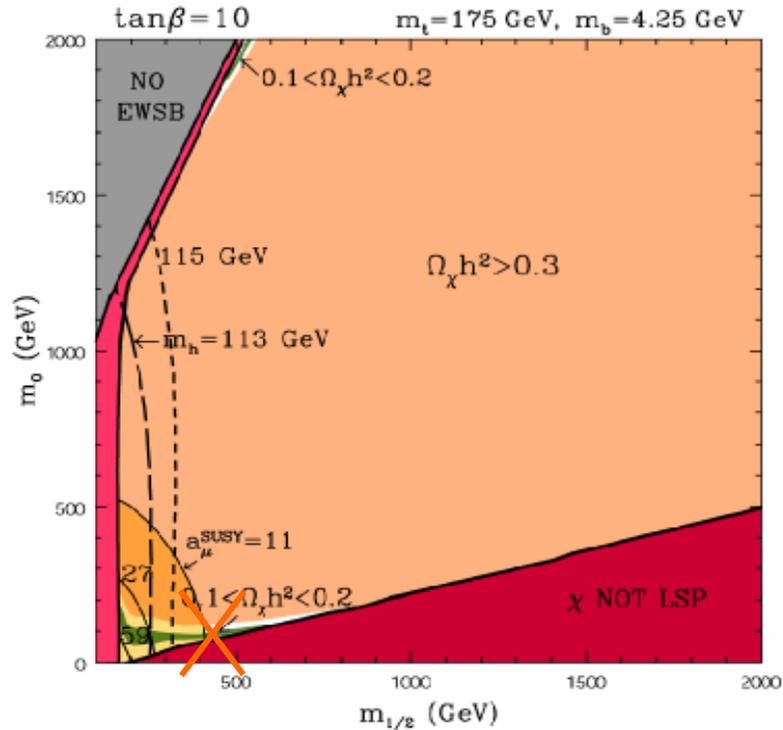


暗黒物質の質量:
5%の精度

対消滅断面積:
7%の精度

比較プロセスのデモンストレーション (MSSM)

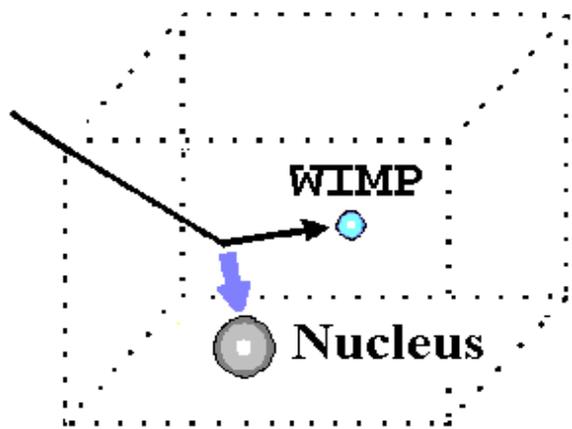
サンプルポイント



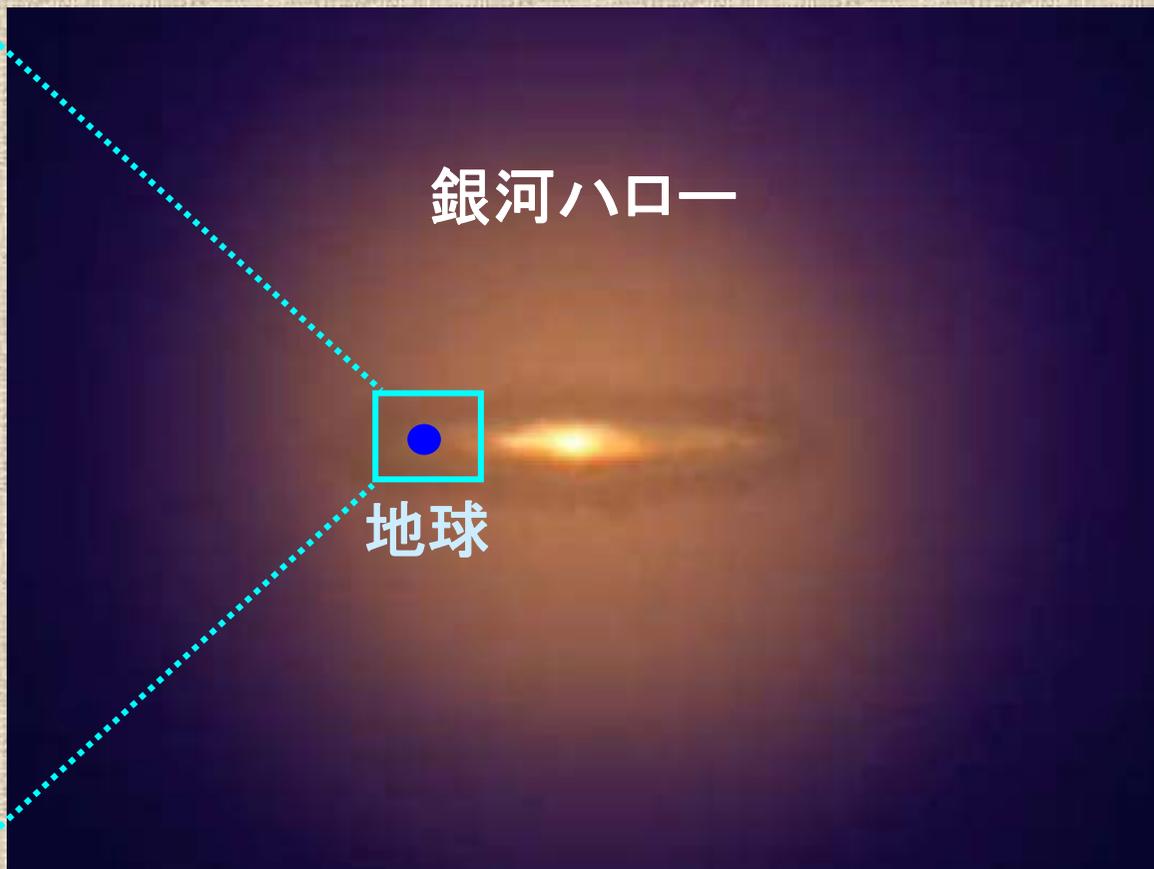
暗黒物質の質量:
10%の精度
対消滅断面積:
Impossible

Neutralino と stau が縮退
残存両は2粒子間の質量
差に強く依存。

LHCで作り出した粒子は本当に暗黒物質か？



暗黒物質と通常物質との散乱の際放出されるエネルギーを利用する。



シグナルは暗黒物質と核子の散乱断面積で決まる

LHC実験結果

暗黒物質の
対消滅断面積
を評価

暗黒物質と核子
の散乱断面積を
評価

現在の宇宙に
おける暗黒物質
残存量を予言

直接検出観測
におけるシグナ
ルを予言

⇕比較

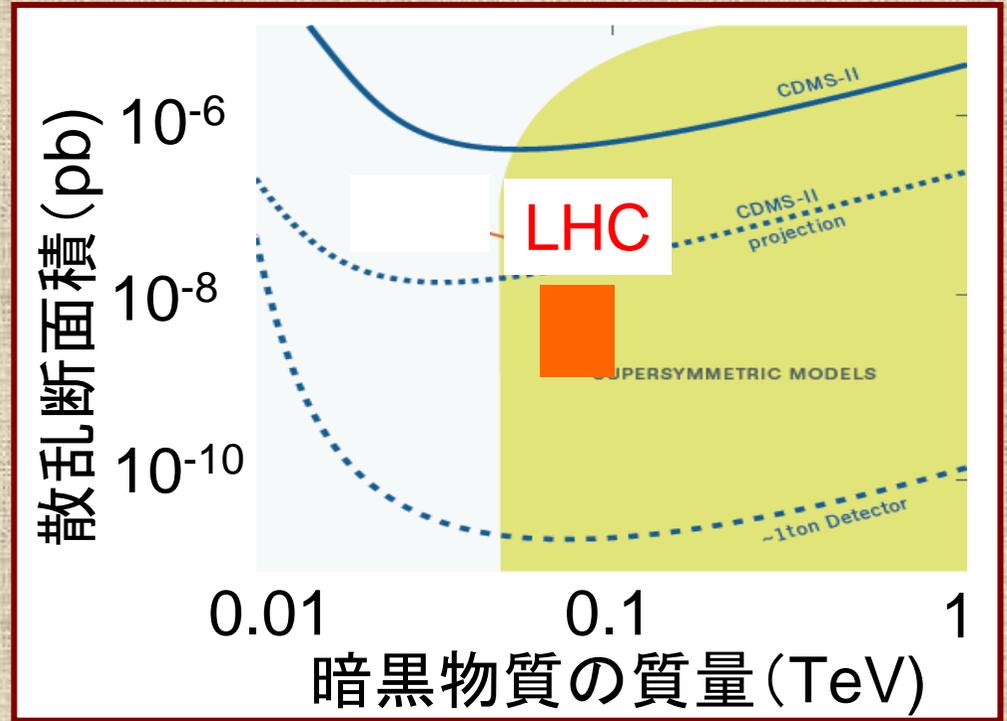
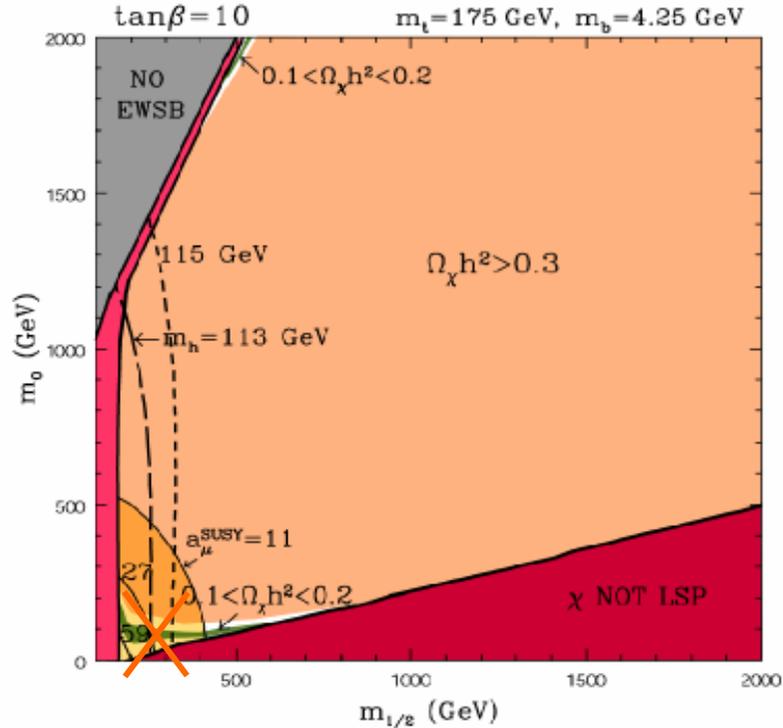
⇕比較

宇宙背景放射
の揺らぎ観測
WMAP, Planck

暗黒物質の
直接検出観測
CDMS, Xmass

比較プロセスのデモンストレーション (MSSM)

サンプルポイント



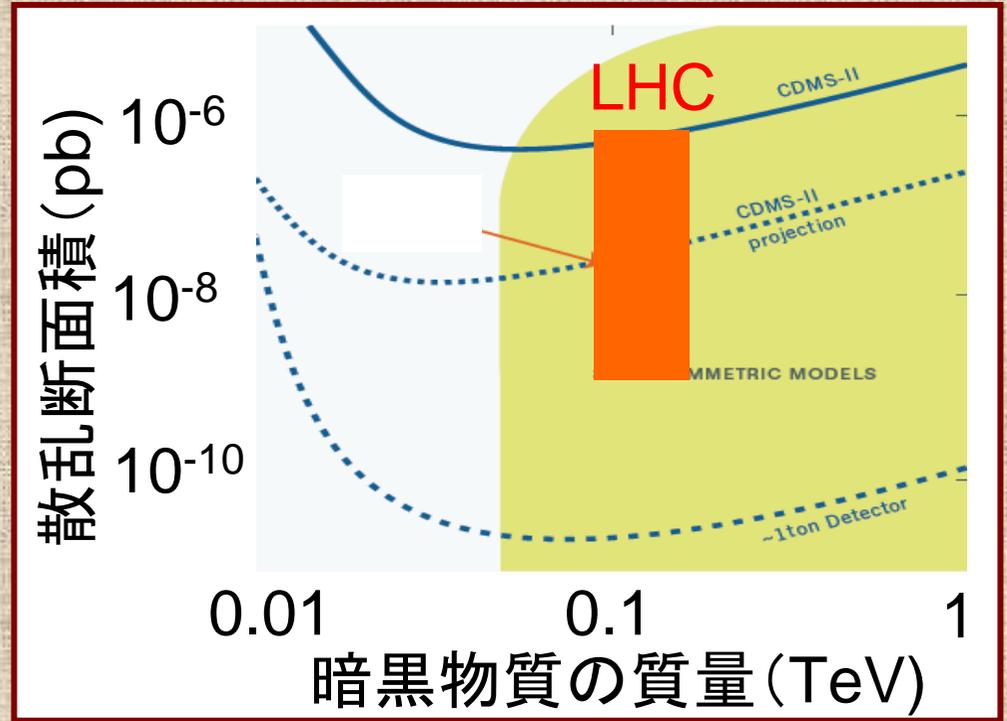
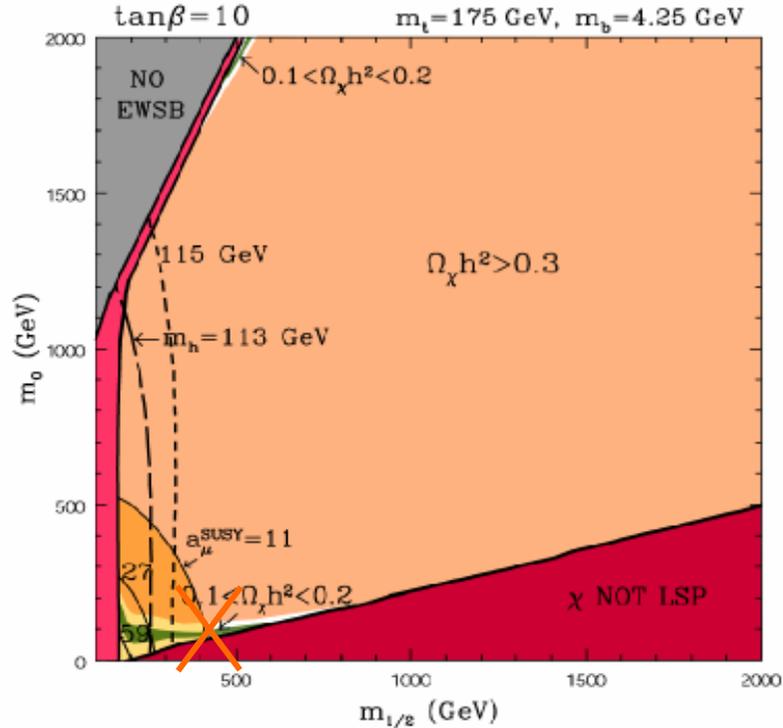
散乱断面積:

$10^{-9} \sim 10^{-8} (\text{pb})$

E.A.Baltz, et.al. (hep-ph/0602187)

比較プロセスのデモンストレーション (MSSM)

サンプルポイント



散乱断面積:
 $10^{-9} \sim 10^{-6} (\text{pb})$

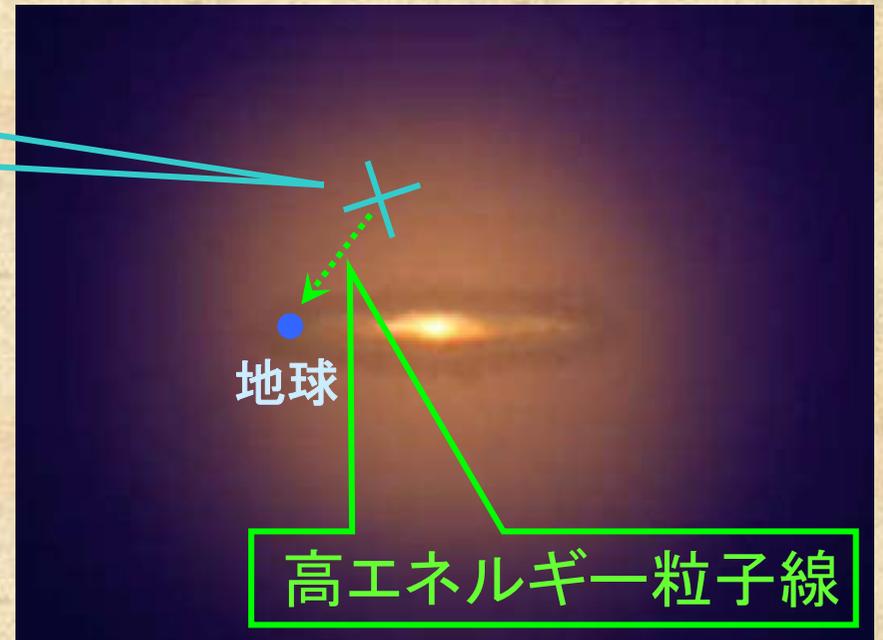
E.A.Baltz, et.al. (hep-ph/0602187)

IV. 天文学への影響

暗黒物質の間接的検出観測

対消滅
暗黒物質 → ★ ← 暗黒物質

シグナルは
暗黒物質の対消滅断面積
と宇宙(銀河)の構造
(例:暗黒物質密度)
で決まる



LHC実験結果

暗黒物質の
対消滅断面積
を評価

暗黒物質と核子
の散乱断面積を
評価

暗黒物質の
対消滅断面積
を評価

現在の宇宙に
おける暗黒物質
残存量を予言

直接検出観測
におけるシグナ
ルを予言

暗黒物質の分
布等の宇宙の
構造を調べる

⇕比較

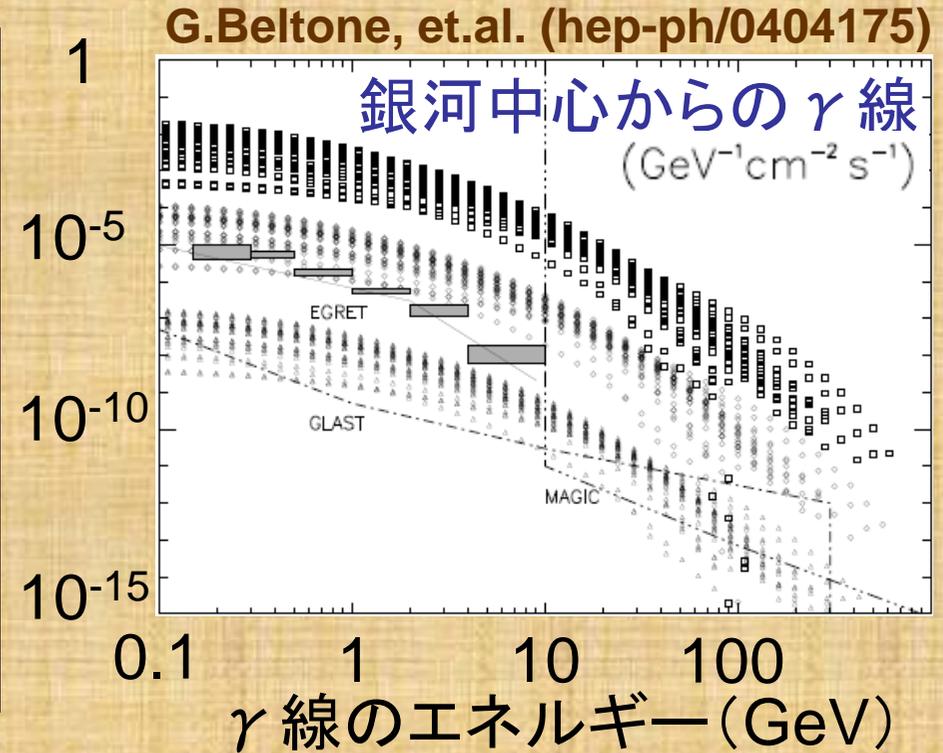
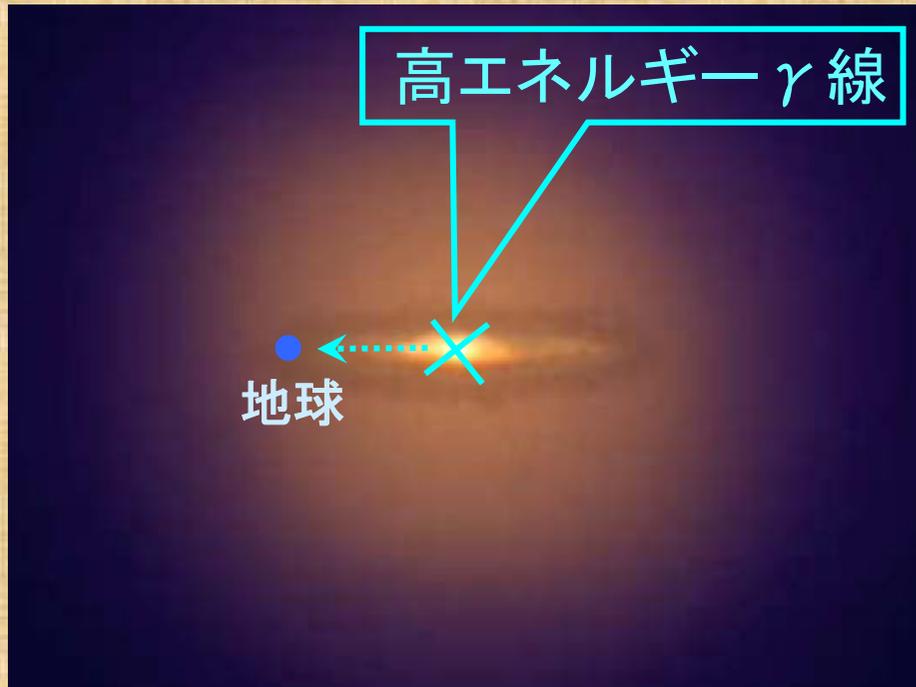
⇕比較

宇宙背景放射
の揺らぎ観測
WMAP, Planck

暗黒物質の
直接検出観測
CDMS, Xmass

暗黒物質の
間接検出観測
GLAST等

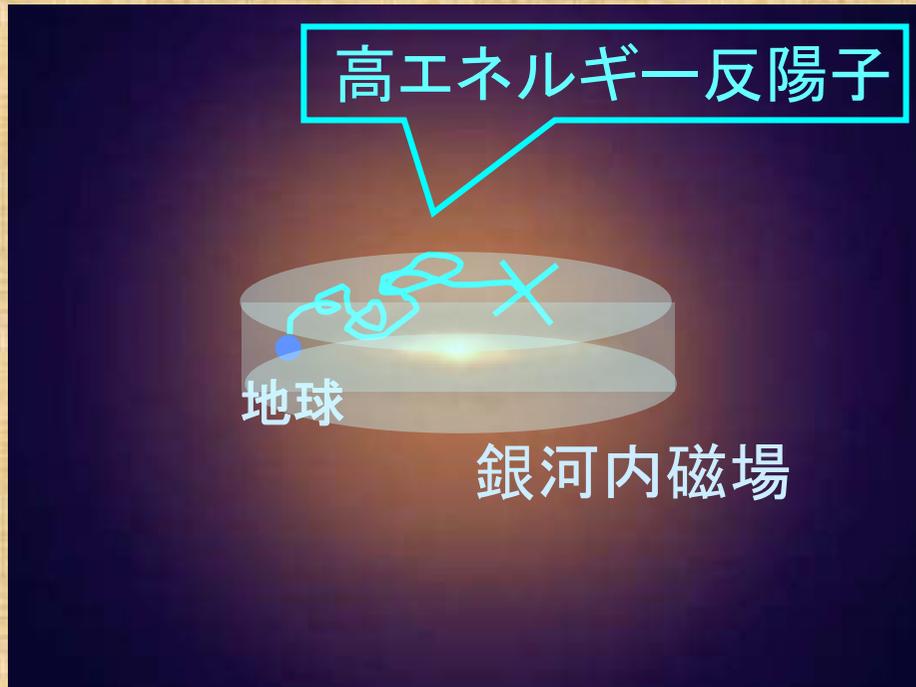
γ 線を用いた観測



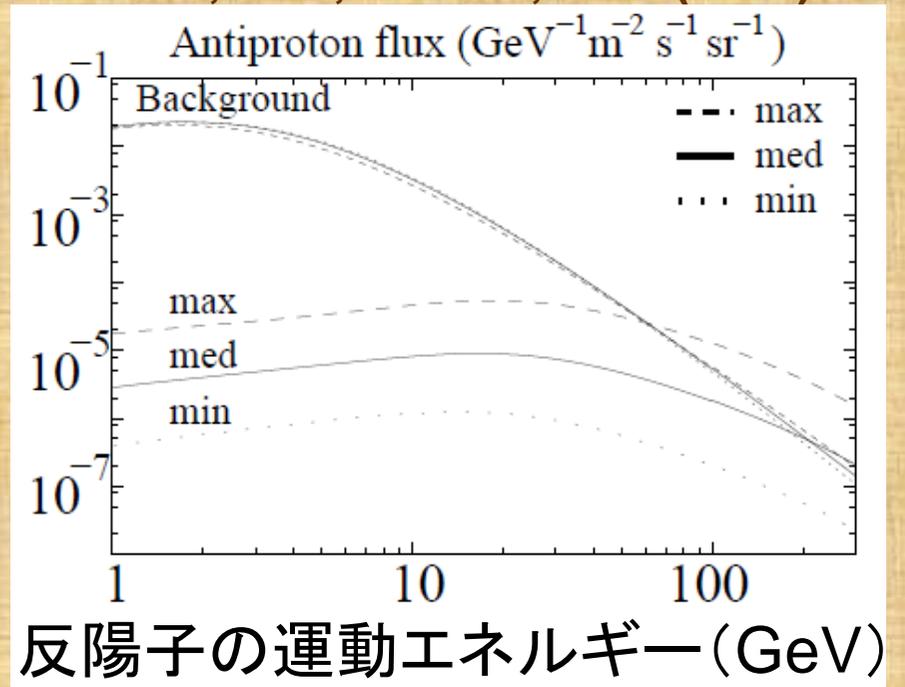
γ 線フラックス $\propto (\sigma v) \times n_{\text{DM}}^2$ (n_{DM} : 暗黒物質の数密度)

⇒ 銀河内における暗黒物質分布の評価

反陽子を用いた観測



Hisano, S.M., Senami, Saito(2006)



反陽子フラックス $\propto (\sigma v) \times$ 銀河内磁場の体積

\Rightarrow 銀河磁場が(垂直)方向にどの程度広がっているか評価

まとめ

- LHC実験は、素粒子物理学においてのみならず**宇宙物理学**にとっても非常に重要。
- 特にLHCにおいて**暗黒物質の正体解明**が期待される。
- LHCの実験結果と宇宙物理の観測を比べる事により、**宇宙最初期での熱史、現在の宇宙の構造**について調べる事が可能である(暗黒物質天文学の始まり)。

議論

- LHC(ILC)で、暗黒物質の性質決定が**どの程度の精度**で行えるか？
- 暗黒物質を用いた宇宙の構造探査は、**どの程度の精度**で行えるか？
- LHC実験で、**暗黒エネルギー**について何か言えるか？