

暗黒物質に迫る

TeV gamma-ray from DM Annihilation

Shigeki Matsumoto (Kavli IPMU)

LHC実験におけるヒッグス粒子の発見および新物理シグナルの未発見により弱い相互作用をする(ウィーク・アイソスピンを持つ)WIMP暗黒物質が最近注目を集めている。このような暗黒物質を検出するためには、高エネルギーガンマ線観測(つまりCTA実験)が最も有効である。

WIMP暗黒物質

～ WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) 仮説 ～

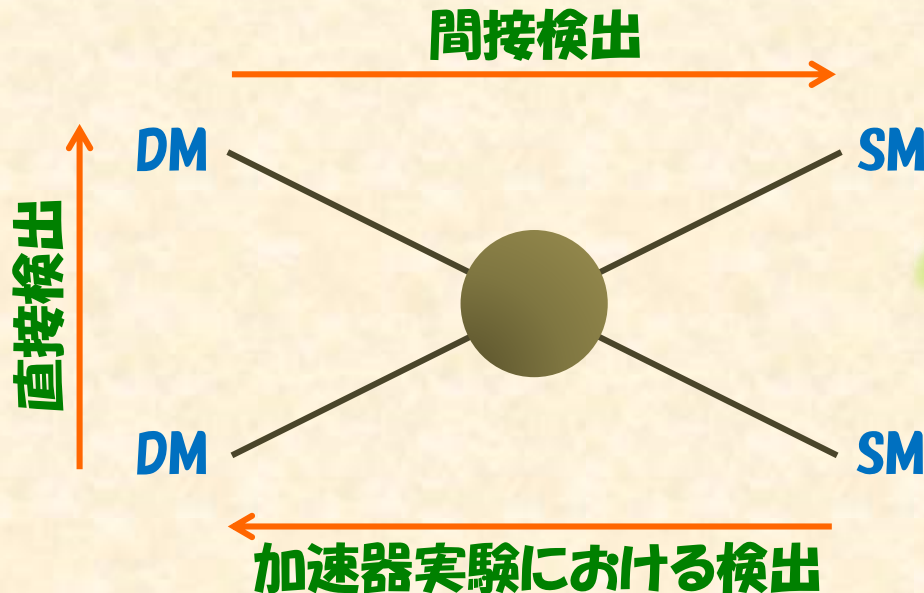
暗黒物質は質量が $0(0.1 - 1)$ TeVの安定な中性粒子であるとする仮説。

暗黒物質の宇宙論と非常に相性が良い。

- ・ 相互作用がなぜ弱いのかを説明。
- ・ 暗黒物質が現在冷たい理由を説明。
- ・ 暗黒物質残存量 $\Omega_{\text{DM}} h^2 \sim 0.1$ を説明。

素粒子物理学と非常に相性が良い。

電弱対称性の破れを説明する新物理模型において予言される。WIMP質量と電弱スケールは同じ起源を持つ事が可能。



現在、直接検出はものすごい精度で暗黒物質と通常物質(原子核)の散乱断面積を調べている。

↓
優位なシグナルは得られてない。

↓
 $\sigma(\text{DM } N \rightarrow \text{SM } N) < 1 - 10 \text{ zb!}$
[暗黒物質の性質に重要な示唆]

WIMP暗黒物質

色々なWIMP候補	カラー荷	電荷	弱い相互作用	具体例
スカラーWIMP 1	なし	なし	しない	Minimal DM
スカラーWIMP 2	なし	なし	する	Inert Higgs
フェルミオンWIMP 1	なし	なし	しない	Bino, Singlino
フェルミオンWIMP 2	なし	なし	する	Wino, Higgsino
ベクターWIMP 1	なし	なし	しない	Little Higgs DM
...

暗黒物質の直接測定 → $\left\{ \begin{array}{l} \checkmark \text{ 暗黒物質は弱い相互作用の固有状態に近い。} \\ \checkmark \text{ ボゾニックWIMPが強い制限を受けつつある。} \end{array} \right.$

Higgs粒子の発見 @ LHC
新物理の未発見 @ LHC

→ $\left\{ \begin{array}{l} \checkmark \text{ ヒッグス粒子が軽いのでやはり超対称模型?} \\ \checkmark \text{ } O(M_{pl}) \text{ の物理が電弱相転移の直接の原因?} \end{array} \right.$

↓
暗黒物質の存在は確定している為、もしWIMPであればその質量は $O(\text{TeV})$ 以下。

- ✓ 例) Pure Gravity Mediated SUSY [Ibe, Moroi, Yanagida] → Wino DM
- ✓ 例) Maximal Entropy Principle [Hamada, Kawai, Oda] → Triplet DM

弱い相互作用をするWIMP暗黒物質

弱い相互作用をするWIMP暗黒物質の質量

0(1)の結合定数を持つ弱い相互作用をするため、質量は0(1)TeVと予言される。

- ✓ Winoの場合は熱的残像量で $\Omega_{\text{DM}}h^2 = 0.1$ を説明すると約3TeVの質量。
[J.Hisano, S.M., M.Nagai, O.Saito, M.Senami, PLB626, 2007]
- ✓ Higgsinoの場合は熱的残像量で $\Omega_{\text{DM}}h^2 = 0.1$ を説明すると約1TeVの質量。
[J.L.Feng, K.T.Matchev, F.Wilczek, PLB482, 2000]

加速器による検出

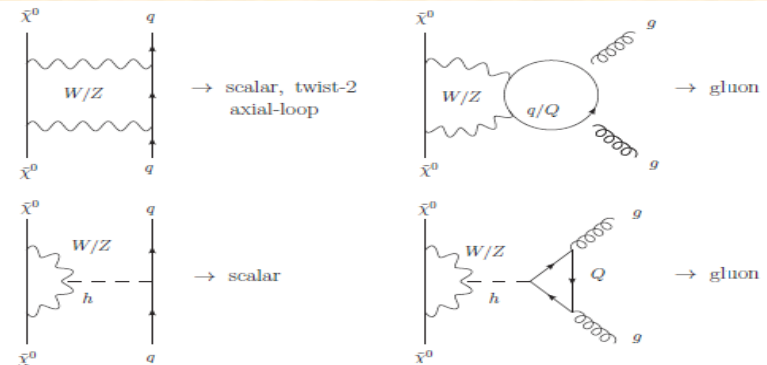
この様なWIMPは重いのでやはり大変。

LHCではWIMPの荷電パートナーとの質量差が小さければ消失荷電トラックで探査。[例)Winoで500GeV程度]

ILCでは直接生成およびSM過程の精密測定を用いて探査。直接生成では $0.5 \times s^{1/2}$ まで探査可能[例)Winoで精密測定により $\sim s^{1/2}$ まで探査可能]

直接測定による検出

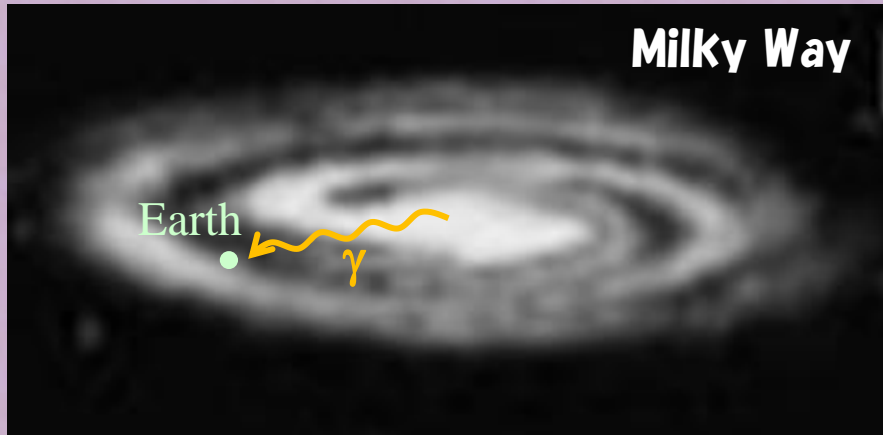
輻射過程で核子との散乱が起こる。



[J.Hisano, K.Ishiwata, N.Nagata, PRD87, 2012]

[例) Winoで $0(10^{-11})\text{pb}$ の断面積]

弱い相互作用をするWIMPとガンマ線観測



様々なタイプの間接検出が考えられる！

反陽子等 … 伝搬の理解が進むと強力

陽電子等 … BG(e^+ anomaly)の理解重要

ニュートリノ … 捉えづらいけどクリーン

γ 線 … 重要!(BG&DM分布の理解が鍵)
[銀河中心, dSphs, Diffuse, …]

弱い相互作用をするWIMPの対消滅過程



- 弱い相互作用をするWIMP暗黒物質は主に弱い相互作用のゲージ粒子に対消滅する。
[弱い相互作用をするWIMP暗黒物質の対消滅断面積はSommerfeld効果で増大！]
- このWIMPは荷電パートナーが必ず付随して、輻射過程を通じ直接光子に対消滅する。
[縮退傾向にある荷電パートナーの存在により、この対消滅過程の分岐比が増大！]

弱い相互作用をするWIMPとガンマ線観測

弱い相互作用をするWIMPの対消滅過程

将来のガンマ線観測(CTA)を見据えて、対消滅断面積が高精度で計算されつつある。

Sommerfeld効果の発見

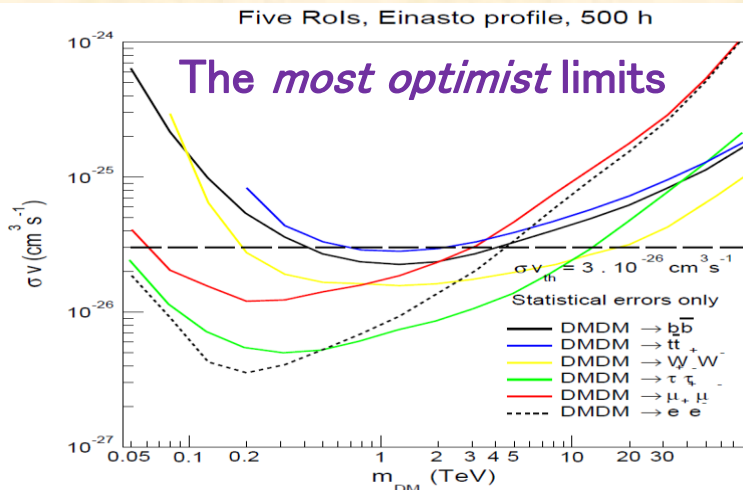
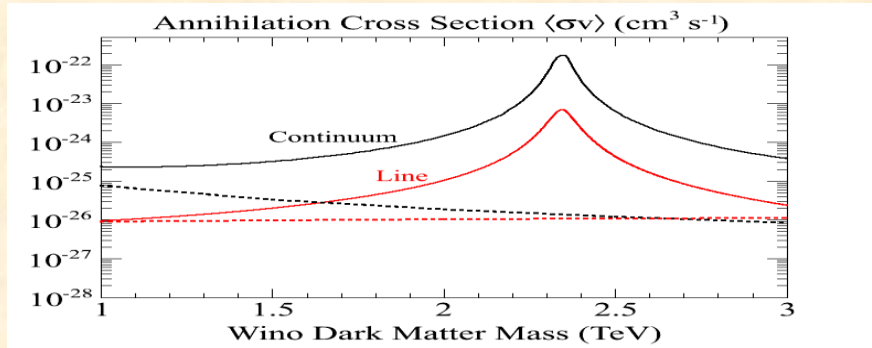
[J. Hisano, M. Nojiri, S.M., PRL92, 2004]

単色ガンマ線を出す断面積のNLO計算

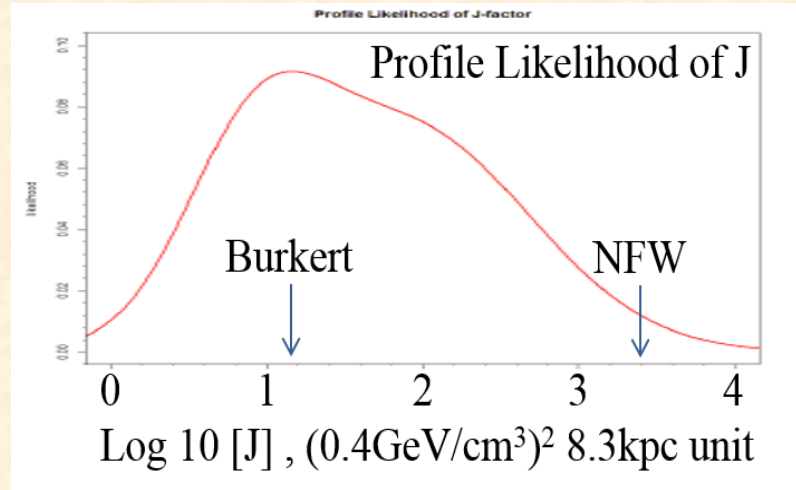
[A. Hryczuk, R. Iengo, JHEP1201, 2012]

単色ガンマ線を出す断面積のNLL計算

[M. Baumgart, et.al., G. Ovanessian, et.al.]



[Lefranc, et.al. arXiv: 1502.05064]



[Ibe, Ichikawa, S.M., Morishita, 2014]

まとめ

- LHC(1st run)の結果を受け、様々な新物理が提案及び議論されている。特に暗黒物質に関しては、**弱い相互作用をする(ウィーク・アイソスピンを持つ)WIMP暗黒物質**に大きな注目が集まっている。
- この種類の暗黒物質を探るのに最も適当な実験・観測は暗黒物質の間接検出であり、特に**高エネルギーガンマ線観測を利用した検出**は他の検出よりも不定性が小さく、とても重要であると認識されている。
- また宇宙における残存量が熱的過程のみで決まるとすると(WIMP仮説)、その質量 $O(1)$ TeVとなり、単色ガンマ線への対消滅分岐比も増大する。このため**CTA実験**はこの種類の暗黒物質を探るのに最高である。