

# 暗黒物質探査という名の素粒子物理学発展戦略

**松本 重貴 (Kavli IPMU)**

*Kavli IPMU Thermal Dark Matter Project*

これまで、標準模型を超える新物理構築に向け、**電弱対称性の破れの起源**とそれに付随する「**自然さの問題**」が、**主な指導原理**として用いられてきた。現在は、**暗黒物質の性質解明**が、**新たな指導原理**として台頭しつつある。この変遷や、**新たな指導原理の基での系統的、包括的な研究戦略(の一つ)**について述べる。

+ Hidden sector?

## 素粒子物理学における "Questions"



## 標準模型の拡張を要求するもの

宇宙における暗黒物質の存在。

様々な候補が乱立している状態。

ニュートリノ質量の存在。

最有力モデルはシーソー・モデル。

## 宇宙の初期条件に関するもの

宇宙の平坦性、等方性、構造の種。

最有力モデルはインフレーション。

宇宙のバリオン数非対称性の存在。

最有力モデルはレフトジェネシス。

"Why now?" 問題。

## 標準模型のパラメータに関するもの

暗黒エネルギー(宇宙項)の存在。

電弱相転移の起源(スケール)

3種の結合定数の統一の可能性。

強い力のCP不変性の問題。

3世代の存在(質量問題含む)。

CKM行列が対角行列に近い問題。

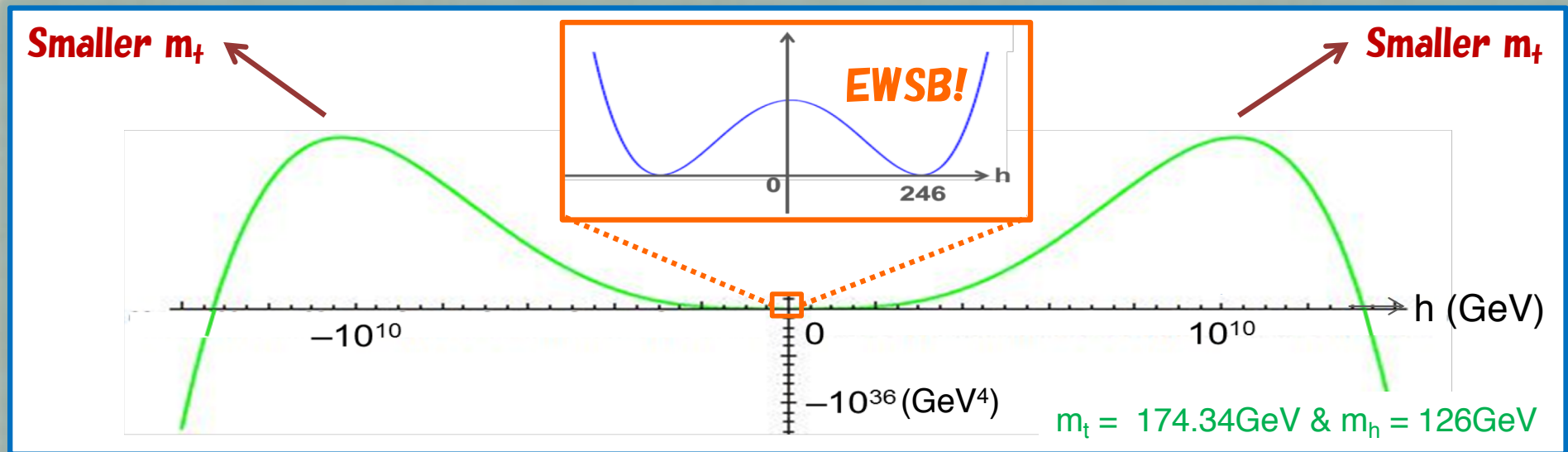
⋮

色々な問題を指摘することも大事!

# 電弱相転移の起源の問題

**何故電弱対称性が破れたのか？ それも何故 $O(100)GeV$ で？**

**大事な点：** SMでは予め電弱対称性が $O(100)GeV$ 程度で破れることを仮定。



**第0近似では電弱対称性は破れてなく何かの理由で小さな破れが起こった？**

超対称標準模型  
複合ヒッグス模型  
ゲージ・ヒッグス模型



破れのスケールが自然に $O(100)GeV$ となるためには、 $O(1)TeV$ 以下に新粒子が存在。  
( $\exists$ カラー粒子&ヒッグスの性質を変更。)

**$O(100)GeV$ の電弱相転移を自然な起源は $TeV$  BSMとは限らない！**  
(必要条件と十分条件の違い。)

機構全体

自然な機構

TeV BSMによる機構



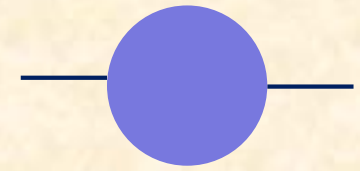
# 機構1: フォーカス・ポイント機構

$$V = m^2 |H|^2 + \lambda |H|^4$$



Tree

+



Corrections

- ✓ ヒッグスの2次項への輻射補正は、新粒子の質量が増大すると大きくなる。
- ✓ ヒッグスの2次項への個々の寄与は大きい一方、その合計は小さくなる。

超対称模型における具体例:

$$m^2 = |\mu|^2 + m_{H_u}^2 + \delta m_{H_u}^2|_{\text{stop}} + \delta m_{H_u}^2|_{\text{gluino}} + \dots$$

Higgsino mass

Heavy Higgs mass

Squark (Stop) mass

Glino mass

通常のEWスケール超対称性模型 → 各項がEWスケールであることを要求。

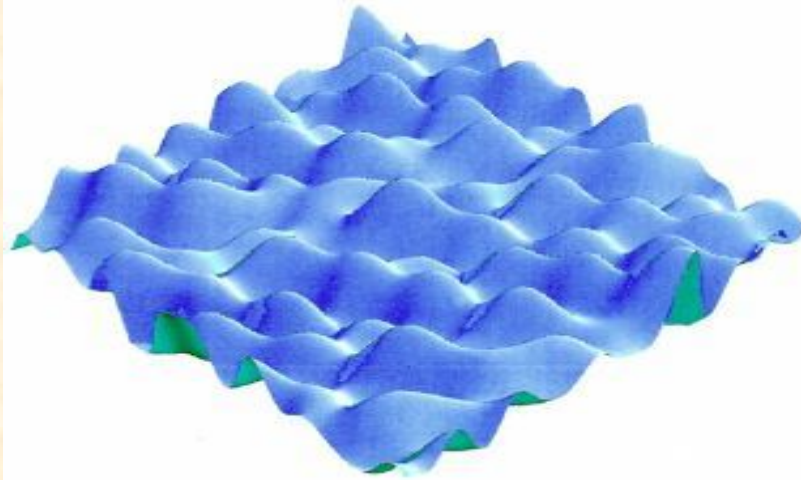
フォーカス・ポイント超対称性模型 → 各項( $\mu$ 以外)が相関を持ち互いに相殺。

自然な電弱相転移を記述する機構でも、TeV以下に新粒子がいるとは限らない!  
(超対称模型ではヒグシーノは軽く予言 → 非カラー粒子探査 → 詳細@白板)



## 機構2: 多元宇宙機構 (Multiverse)

≡ 多くの真空 from 弦理論



+

多弦宇宙生成 from インフレーション



- ① 我々は、上記で予言される多元宇宙の中の一つの宇宙に住んでいる。
- ② 各真空(宇宙)は異なった物理定数(宇宙項、ヒッグス質量、...)を持つ。
- ③ 我々(観測者)が存在できる宇宙は、多元宇宙の中の一握りの宇宙。

我々の測定する観測量は、理論が予言する様々な値の内、観測条件(我々がその宇宙自身に存在できる条件)を満たすもののみとなる。(バイアスが掛かる。)

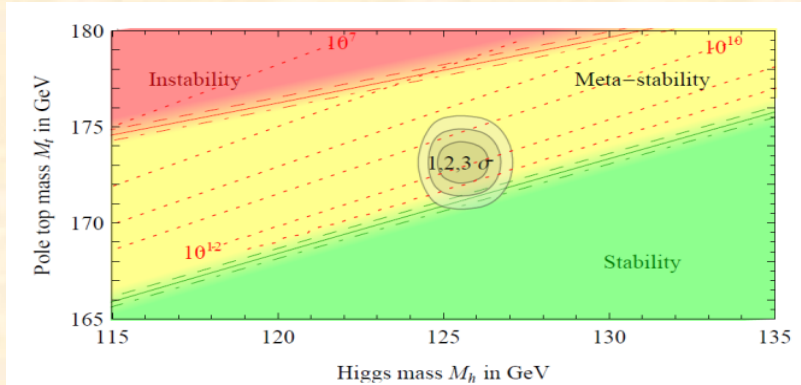
そもそもは、宇宙項問題に適応されたが、電弱相転移の問題にも適応可能!

注) 多元宇宙機構の予言は、負の空間曲率(宇宙)や非零の宇宙項の値等。

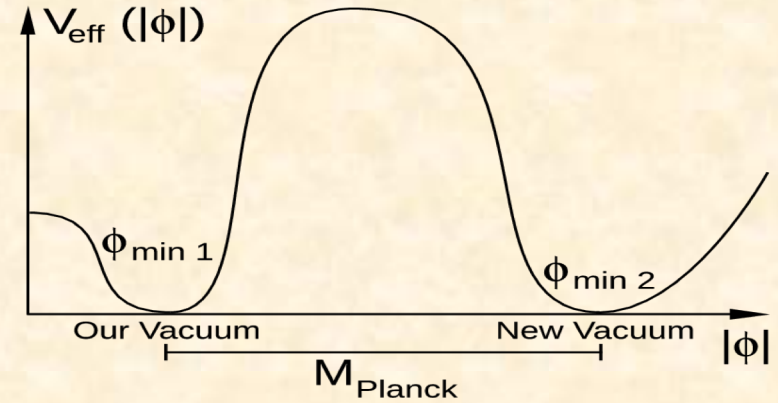
# 機構3: Multiple point principle (MPP) 機構

[C. Froggatt, H. Nielsen, 1996]

縮退した真空により(場の理論を超えた理論)EWスケールを自然に導出可能?



[G. Degrassi, et. al, 2012]



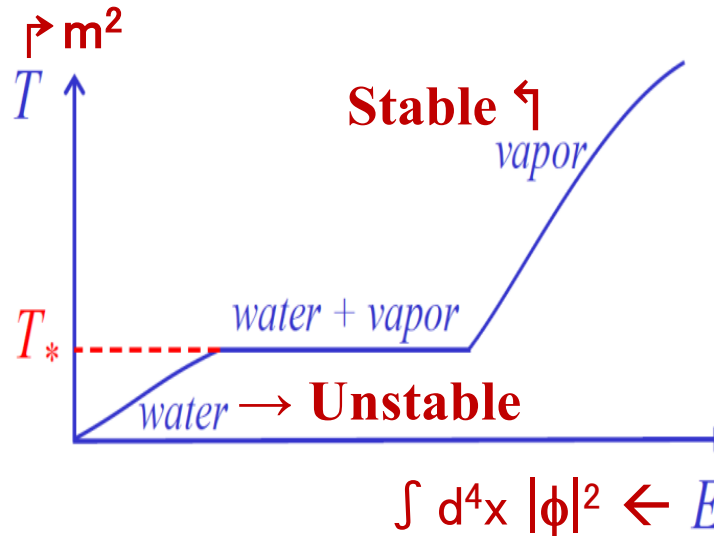
◎ Canonical

$$\int [d\varphi] e^{-\beta H[\varphi]}$$



◎ Micro-canonical

$$\int [d\varphi] \delta(H[\varphi] - E)$$



◎ Field theory (SM)

$$Z = \int [d\varphi] e^{iS[\varphi]}$$



◎ More fundamental  
??????????????

示強性変数(結合定数)ではなく、示量性変数(場の値)で記述された理論的な枠組みを構築できれば、EWスケールを自然に説明することが可能となるかも。

+ Hidden sector?

## 再び素粒子物理学における“Questions”



## 標準模型の拡張を要求するもの

宇宙における暗黒物質の存在。  
 様々な候補が乱立している状態。  
 ニュートリノ質量の存在。  
 最有力モデルはシーソー・モデル。

## 宇宙の初期条件に関するもの

宇宙の平坦性、等方性、構造の種。  
 最有力モデルはインフレーション。  
 宇宙のバリオン数非対称性の存在。  
 最有力モデルはレフトジェネシス。  
 “Why now?” 問題。

## 標準模型のパラメータに関するもの

暗黒エネルギー(宇宙項)の存在。  
 電弱相転移の起源(スケール)  
 3種の結合定数の統一の可能性。  
 強い力のCP不変性の問題。  
 3世代の存在(質量問題含む)。  
 CKM行列が対角行列に近い問題。

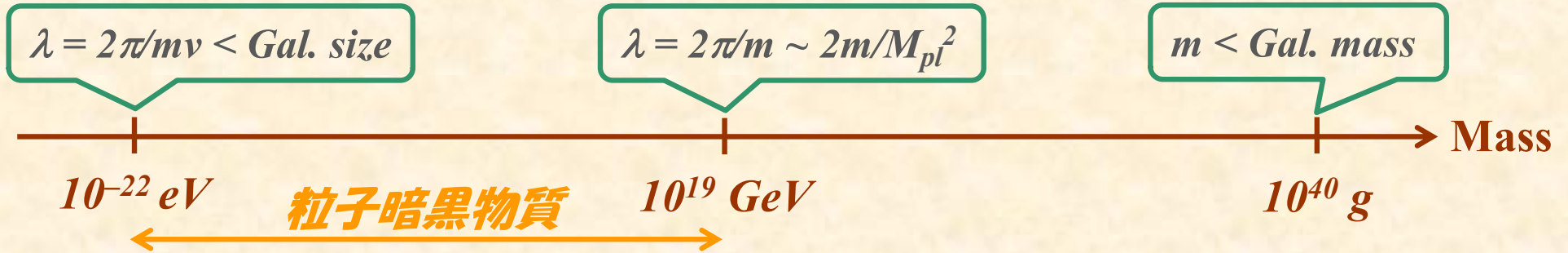
⋮

色々な問題を指摘することも大事!



# 宇宙の暗黒物質問題

暗黒物質に関しては得られている情報がまだまだ少なく、様々な候補が提案。



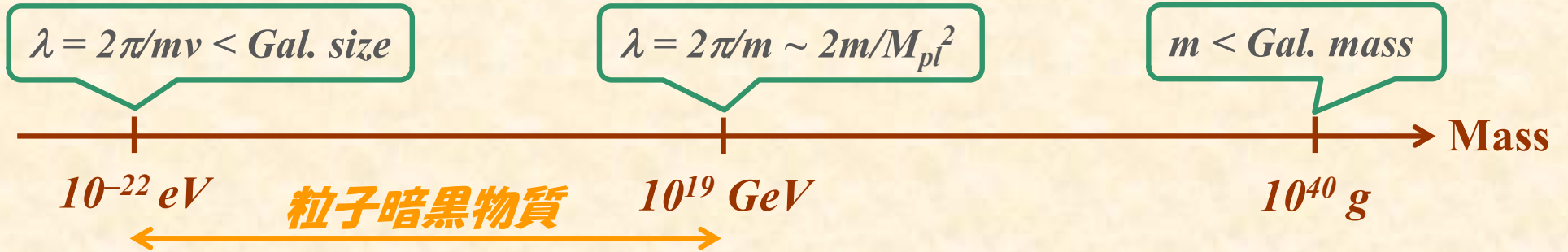
**質量の下限:** 暗黒物質は現在の宇宙において、銀河に付随するハロー(重力による束縛状態)を構成している。束縛状態の大きさはド・ブROI波長で決まるが、これが観測された銀河の大きさと比べ、十分に小さいとの要請により決まる。

**質量の上限:** 暗黒物質は、銀河に付随するハローとして幾つかの重要な役割を果たしている。回転銀河における円盤の安定性の保証等々。暗黒物質自身の質量が、観測された銀河の質量に比べ、十分に小さいとの要請により決まる。

**粒子暗黒物質の質量の上限:** 暗黒物質が(素)粒子のとき、量子力学的効果によりコンプトン波長程度の有効的な大きさを持つ。この波長がシュバルツシルト半径より小さくない、ブラックホールとなってしまうとの要請により決まる。

# 様々な暗黒物質仮説

暗黒物質に関しては得られている情報がまだまだ少なく、様々な候補が提案。

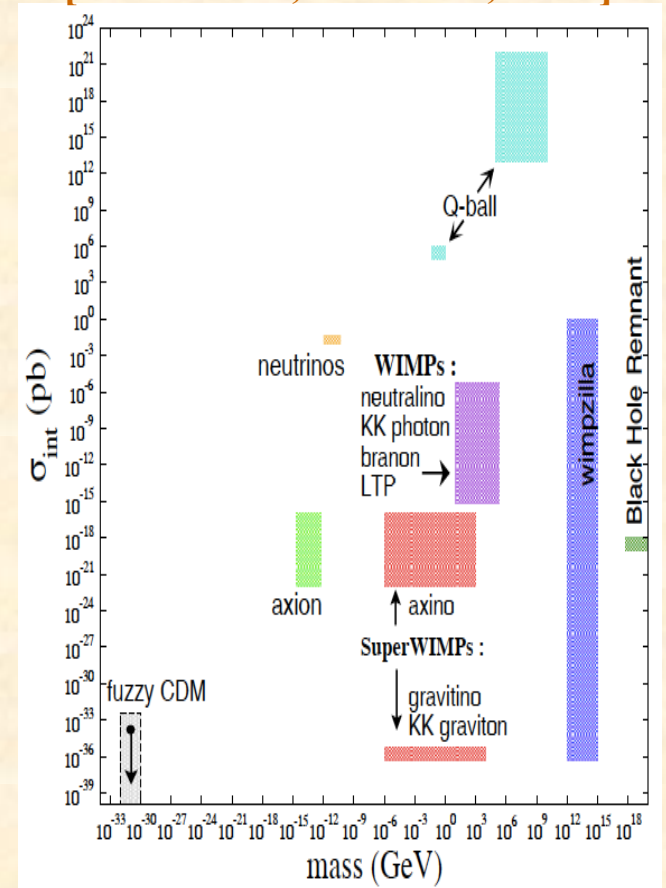


膨大な質量領域を系統的に探査する事は難しいため、様々な暗黒物質に関する仮説を立て検証。 →

暗黒物質研究の戦略 (例えば理論家に聞くと)

1. ある暗黒物質仮説に注目したとき、その仮説がどの様な動機の基に提案されたのかについて。
2. その仮説を定量的に扱う理論的な枠組みの構築と、その探査範囲に関する見積もりについて。
3. 探査範囲の各領域において、暗黒物質がどの様な相互作用をするのかについて。現状も。

[S. Gardner, G. Fuller, 2013]



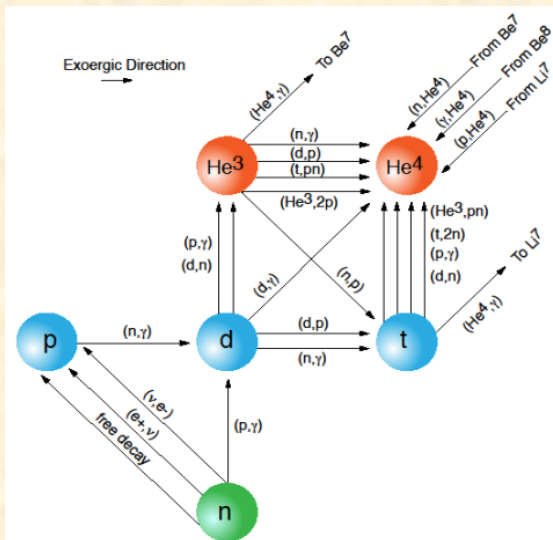
# 熱的暗黒物質(≡WIMP)仮説

**仮説:** DMIは(素)粒子で、初期宇宙での凍結機構により現在の残存量が決まった。

**凍結機構:** 平衡にあった系において、ある時期にその平衡を保つ反応率が宇宙の膨張率を下回ることにより脱平衡が起こり、その残存量が決まるとする機構。

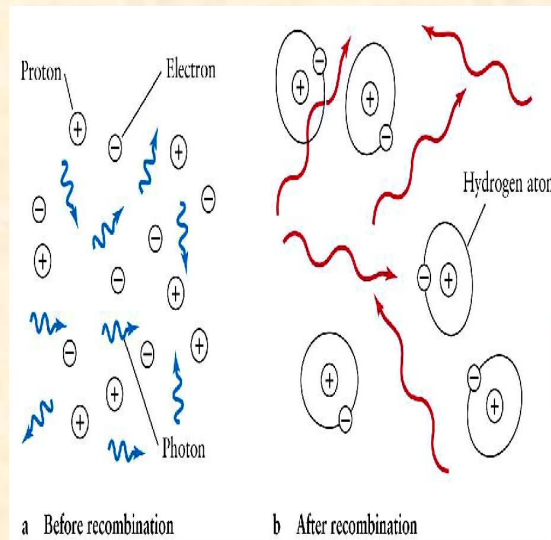
## BBN (成功例1)

熱化学平衡にあった陽子、中性子、原子核( $\alpha$ 粒子、ヘリウム等)が宇宙膨張により脱平衡を起こして、各種の残存量が決まった。



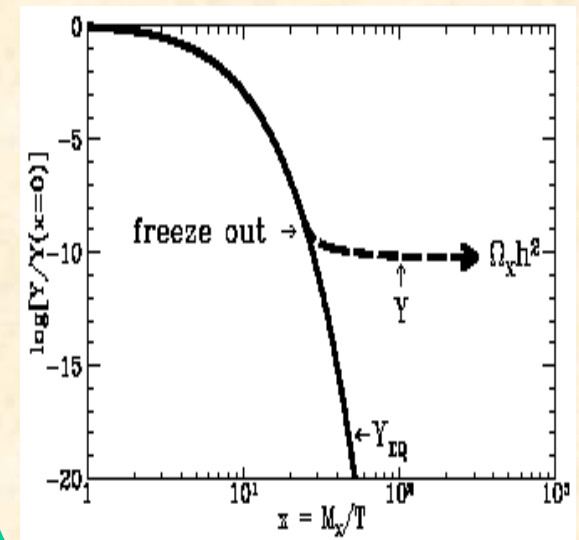
## 再結合 (成功例2)

熱化学平衡にあった電子、原子核、原子、光子が、反応率と宇宙膨張の競争により脱平衡し光子の残存量(温度)が決まった。



## 熱的暗黒物質

熱化学平衡にあった暗黒物質粒子と標準模型素粒子が、脱平衡を起こすことにより現在の宇宙の暗黒物質質量が決まる。





# 熱的暗黒物質仮説の探査範囲

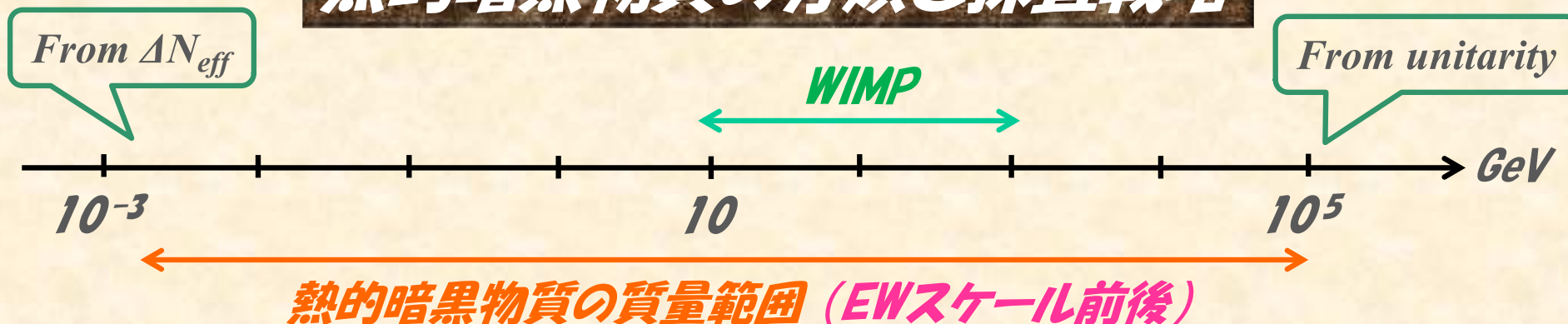


**質量の下限:** 熱的暗黒物質は  $T \sim m/10$  で脱平衡を起こす。もし  $T < 1\text{MeV}$  だと、ニュートリノ達は、他の粒子(電子や光子)から既に脱平衡を起こしているため、暗黒物質が蓄えていたエントロピーは、ニュートリノ達と他の粒子達に非対称に配られる。その結果ニュートリノとCMBの温度差に寄与するが、そのような寄与は現在のCMBの精密観測から制限されており、これが質量の下限を与える。

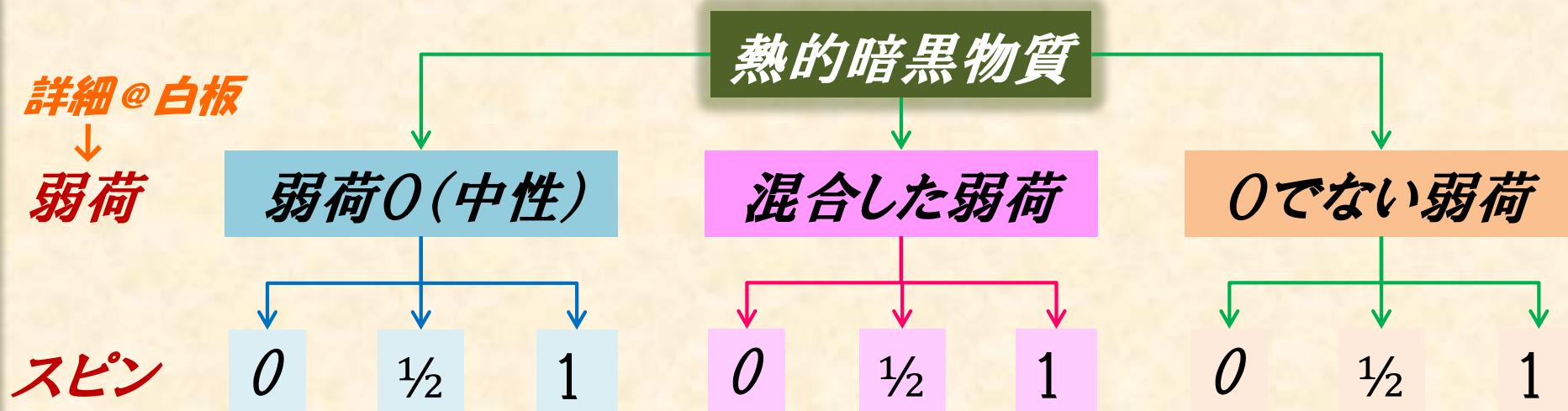
**質量の上限:** 熱的暗黒物質の現在の宇宙における残存量は暗黒物質の対消滅断面積に反比例する。一方、場の理論では、量子力学的な確率解釈可能条件(ユニタリティー)により、あらゆる断面積に上限が存在する。この上限は素粒子の質量が大きくなるほど厳しくなるため、暗黒物質の質量がある臨界の質量を超えると現在の残存量を説明できなくなるため、これが質量の上限を与える。

熱的暗黒物質は、その質量がEWスケールるときWIMPと呼ばれる。質量の起源をEWSBの起源に求めることができ、かつその残存量は観測と同程度となる。

# 熱的暗黒物質の分類と探査戦略

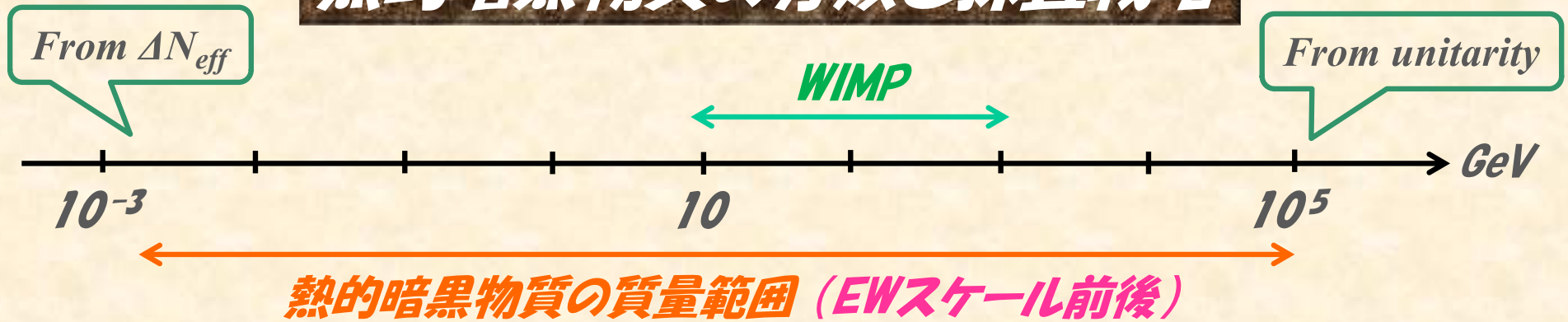


- ✓ 標準模型の素粒子(達)と、ある程度の強さを持ち、必ず相互作用をする。
- ✓ 標準模型のどの素粒子と主に相互作用をするのかについては多様性を持つ。
- ✓ 熱的暗黒物質を“Charge”に基づいて分類することで系統的な探査が可能。  
(相互作用ごとの分類は、場の理論の特性から、有効な方法ではない!)



熱的暗黒物質は電荷とカラー荷を持たないため、弱荷とスピンの系統的な分類。

# 熱的暗黒物質の分類と探査戦略



## 熱的暗黒物質に関する系統的な探査

1. 各量子数を持つ熱的暗黒物質に対し、繰り込み可能な最小モデルを構築。
2. 最小モデルの予言する相互作用に基づき熱的残存量を計算し範囲を確定。
3. これまでの暗黒物質探査からの制限等を反映し探査すべき領域を明示。
4. 探査領域内で更なる動機(BSMモデル等)を持つときその部分領域も明示。

このような熱的暗黒物質の系統的探査に基づいた戦略は以下の論文がきっかけ。

PHYSICAL REVIEW D 82, 055026 (2010)

### Can WIMP dark matter overcome the nightmare scenario?

Shinya Kanemura,<sup>1,\*</sup> Shigeki Matsumoto,<sup>2,†</sup> Takehiro Nabeshima,<sup>1,‡</sup> and Nobuchika Okada<sup>2,§</sup>

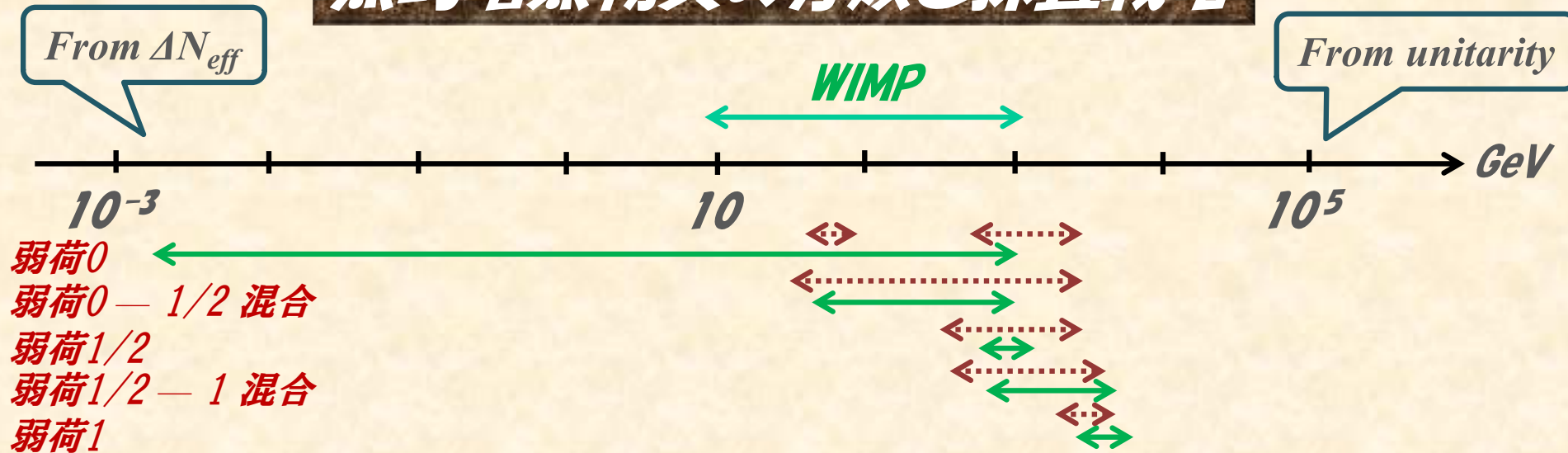
<sup>1</sup>Department of Physics, University of Toyama, Toyama 930-8555, Japan

<sup>2</sup>Department of Physics and Astronomy, University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama 35487, USA

(Received 6 June 2010; published 29 September 2010)

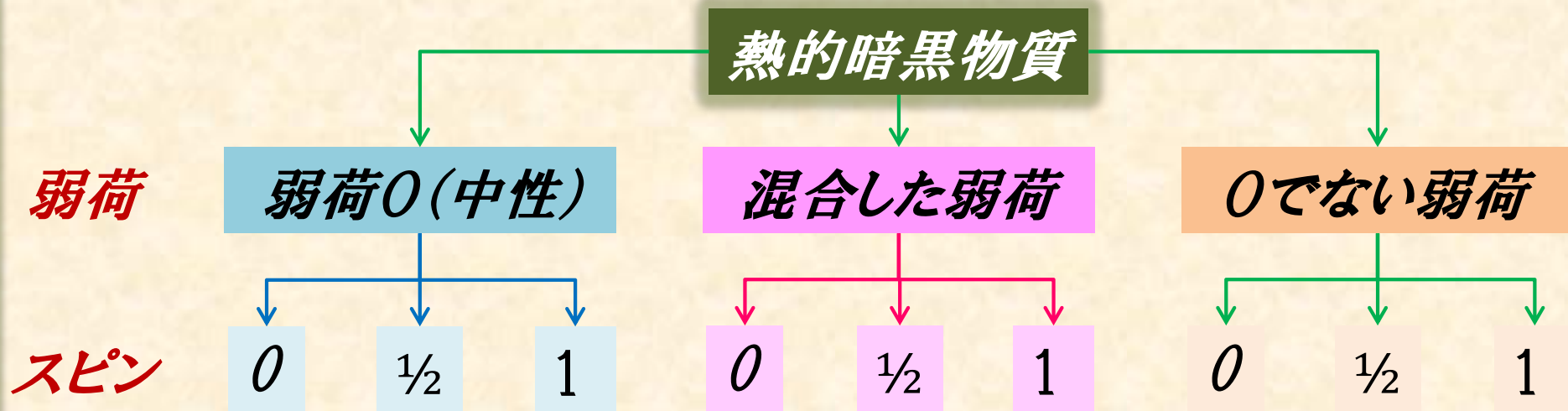


# 熱的暗黒物質の分類と探査戦略



実線はフェルミオン熱的暗黒物質の場合、点線はスカラー熱的暗黒物質の場合。

熱的暗黒物質の多様性！素粒子標準模型のどの素粒子と主に反応するのか？



熱的暗黒物質は電荷とカラー荷を持たないため、弱荷とスピンの系統的に分類。

# まとめ1

素粒子物理学における様々な“Questions”の中で、**電弱相転移の起源の問題**は、第一の解決案がテラスケール以下の新物理学を予言するため、高エネルギー分野において重要な指導原理(素粒子物理学の発展戦略)となってきた。

現在でもこの第一の解決案の検証が進んでいるが、一方で中々新物理シグナルが受からないこともあり、**他の解決案**についても精力的な研究が始まっている。

同時に、**暗黒物質問題**における重要な解決案の一つである**熱的暗黒物質仮説**もテラスケール程度以下の新物理学を予言するため、高エネルギー分野におけるもう一つの重要な指導原理とないつつあり注目を集めている(本講演の主題)。

熱的暗黒物質を系統的に研究するため、**量子数による分類**に基づいた具体的なプログラムを提案した。この手法は最終的には最小有効理論の研究に繋がる。

有効理論上で、**現在までの実験・観測で制限された領域**、**近い将来に期待される探査領域**、**いまだ探査のめどが立っていない領域**、**また理論の観点で重要な動機を持つ(持ち得る)領域**について、**定量的な比較・検討が可能となる**。