

素粒子論的な**暗黒物質**研究の最前線

Particle Dark Matter: A Bird's-Eye View of Recent Progress

藤原 素子 (富山大学)

Based on MF, M. Vollmann [[arXiv:2502.20734](https://arxiv.org/abs/2502.20734)] (accepted by JCAP)

はじめまして

- 名前: 藤原 素子 (ふじわら・もとこ)
- 専門: 素粒子物理学、およびその宇宙論への応用
- 出身: 茨城県 水戸市
- 学術的な軌跡
 - 高校: 水戸一第一高等学校
 - 学部: 慶應義塾大学
 - 大学院: 名古屋大学
 - 研究員(国内): 東京大学
 - 研究員(海外): ミュンヘン工科大学
 - 助教: 富山大学
- 趣味: 編み物、科学を伝えること(=サイエンス・コミュニケーション)



あなたも!

[KMI Science Communication Team: <https://teamkmisc.wixsite.com/home>]

ポケットに物理を

～手のひらサイズで感じる物理の世界～

手のひらにすっぽりおさまる付箋紙は、私たちにとって身近な存在ですよね。メモ帳にもなるし、メッセージカードとしても使えて、様々な用途で重宝します。

ここではもう一つ、まったく新しい付箋紙の使い方をご提案。

それは、素粒子・原子核・宇宙の世界の「ものさし」とすることです。

手のひらサイズの付箋紙を「基準」とすると素粒子・原子核・宇宙の現象は具体的にどんな数字で表されるのでしょうか?

付箋紙を「面積」の基準とすると?
付箋紙と宇宙の「体積」を比べると?
原子核がもし付箋紙の「大きさ」だったら?

下の付箋紙から気になるものをクリックし、付箋紙を通して物理の世界を覗いてみてください。

いままで遠く感じていた世界がぐっと身近に感じることも間違いなし。

さあ、あなたも。

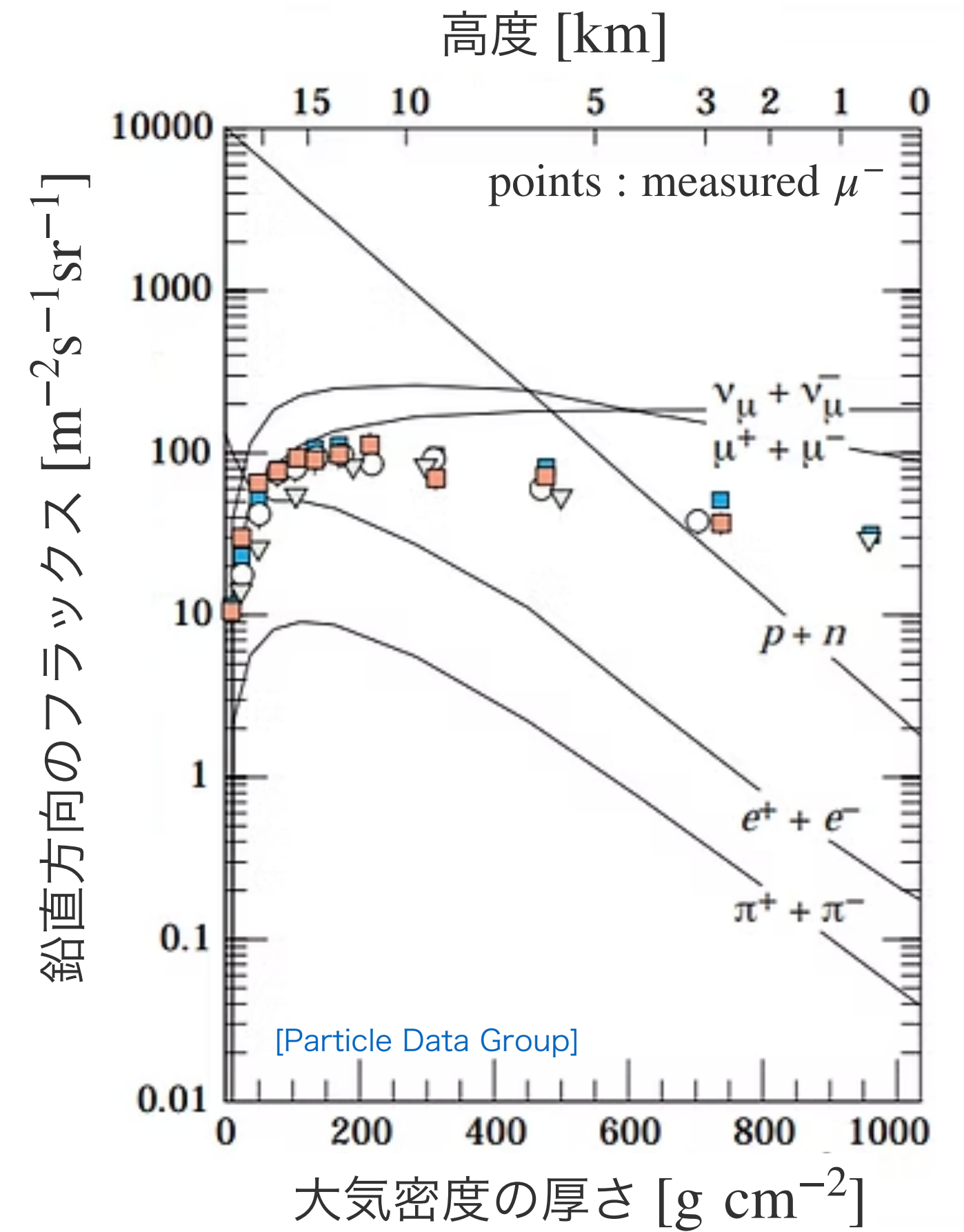
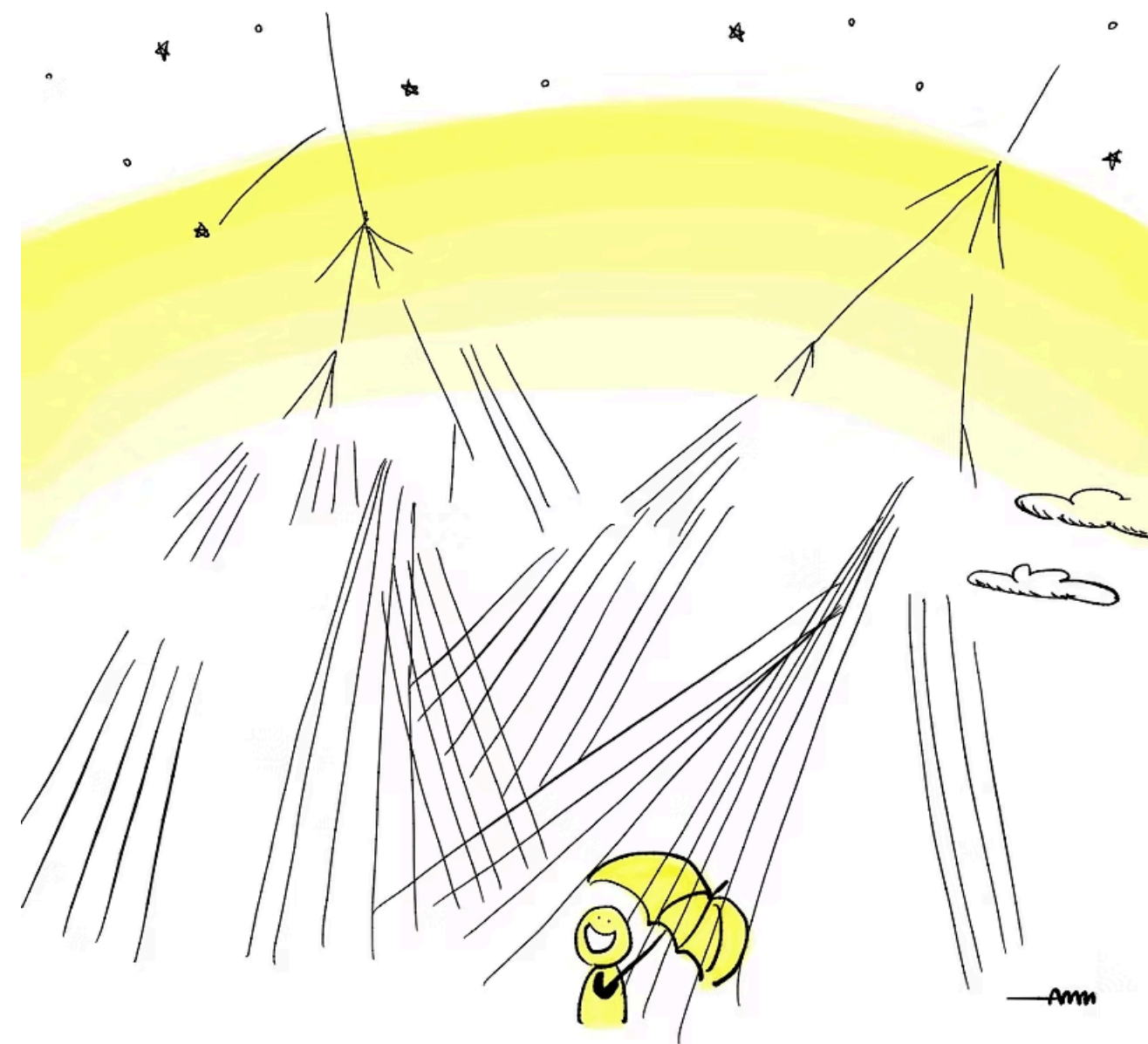
手のひらと空想を広げて、物理の世界を探検してみませんか?



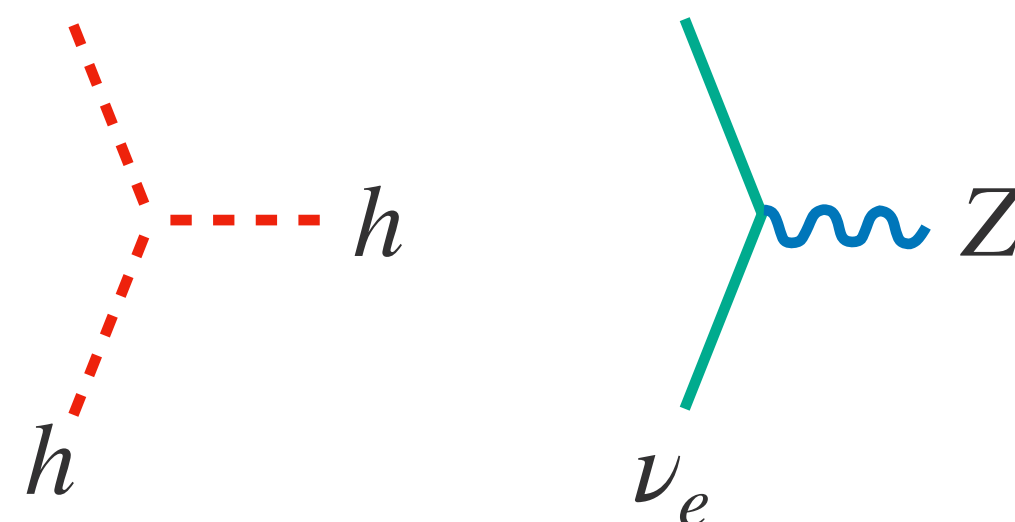
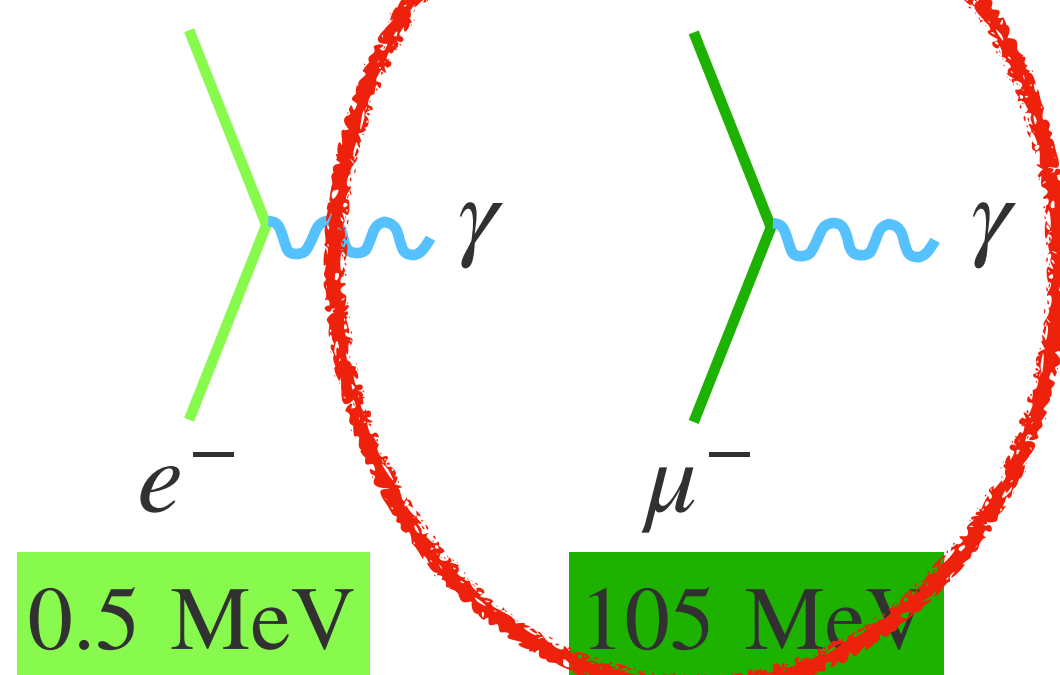
宇宙(そら)から降る素粒子? = 宇宙線

Q: 地表には、様々な種類の粒子が宇宙から降り注いでいます。これらの粒子は一秒間に何個くらい、この付箋紙を通りすぎるのでしょうか?

A: (例) ミューオンの場合 ... 2個程度



- 素粒子 = 「それ以上分割できない(と現状は考えられている)物質の最小単位」
- 素粒子は「量子数: 質量・スピン・(対称性)電荷」というラベルで分類できる
- 例: 電子、ミューオン、光子、ヒッグス粒子、ニュートリノ、他にもたくさん



スピン0
 スピン1/2
 スピン1

現状の理解:
 物質の相互作用を微視的に記述する理論
 = 素粒子標準模型?

コライダー実験の「視力」

LHC実験は、二つの陽子の衝突を通じて、陽子の中にある素粒子(クォーク・グルーオン)どうしの衝突を直接見ることができるほど、高い解像度を持ちます。例えるならば、

「●●の中からこの付箋紙一枚を識別できる視力を持っている」と言えます。

●●に入るのは次のうちどれでしょうか？

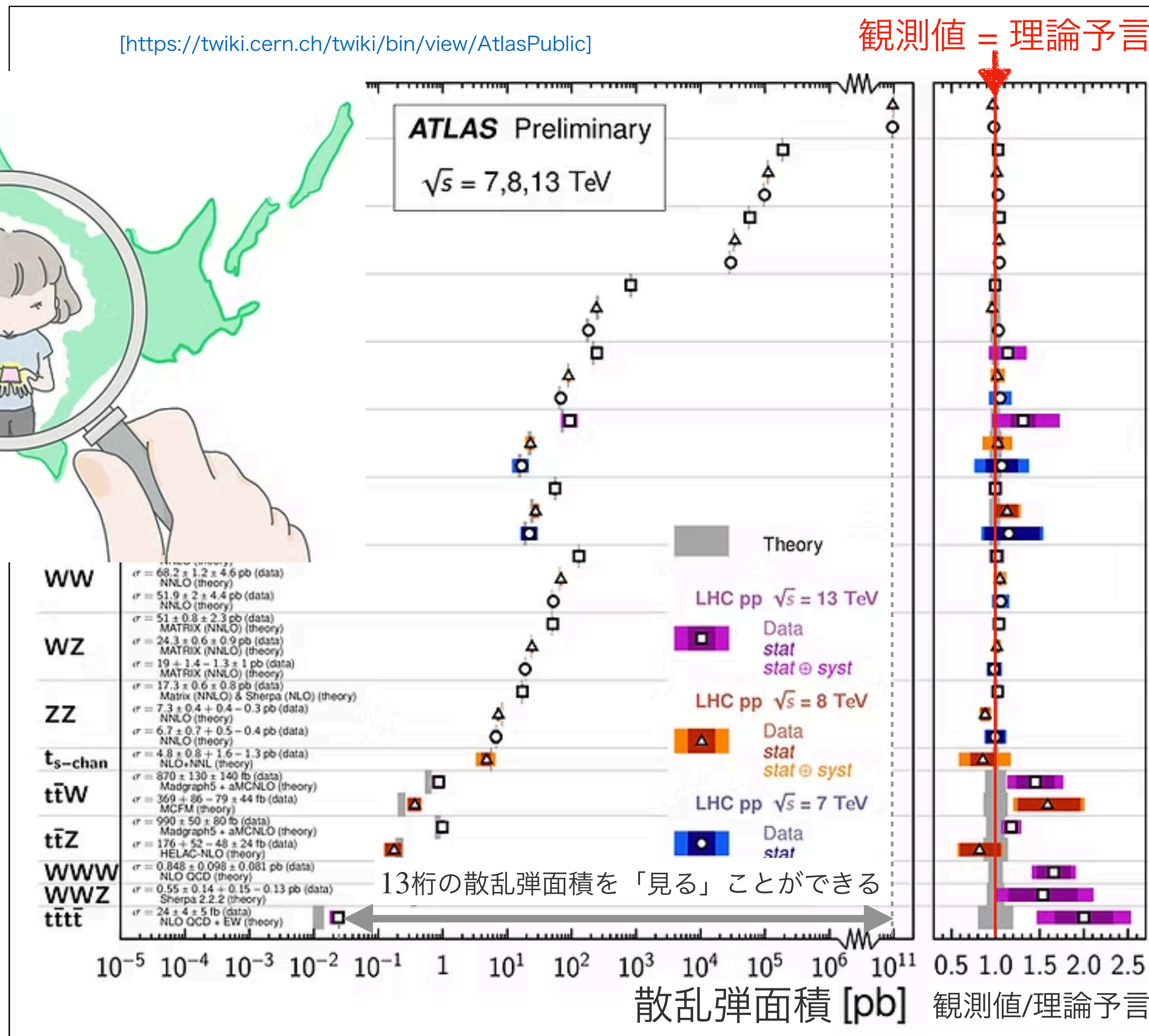
- (1) 東京ドーム
- (2) 名古屋市
- (3) 北海道

A: (3) 北海道 (約8万3千平方メートル)

- 素粒子の物理を実験的に研究するには？
 - 物質をどんどんバラバラにする
 - ミクロな性質が見えてくる
 - バラバラにするには物質にエネルギーを与えれば良い
 - 粒子と粒子を高エネルギーで衝突させる
- 「コライダー物理」 cf. Large Hadron Collider (LHC)実験



[https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic]



* 1 pb = 10⁻⁴⁰ m²

宇宙の時間発展方程式

$$\frac{\dot{a}}{a} = H_0 \left[\frac{C_r}{a^4} + \frac{C_m}{a^3} + \frac{C_c}{a^2} + C_\Lambda \right]$$

宇宙の膨張率
(時刻の関数)

現在の膨張率

$$H_0 \sim 3.2 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$$

宇宙のエネルギー比率で
重みづけされた膨張因子の関数

宇宙のエネルギー比率の収支:

$$C_r + C_m + C_c + C_\Lambda = 1$$

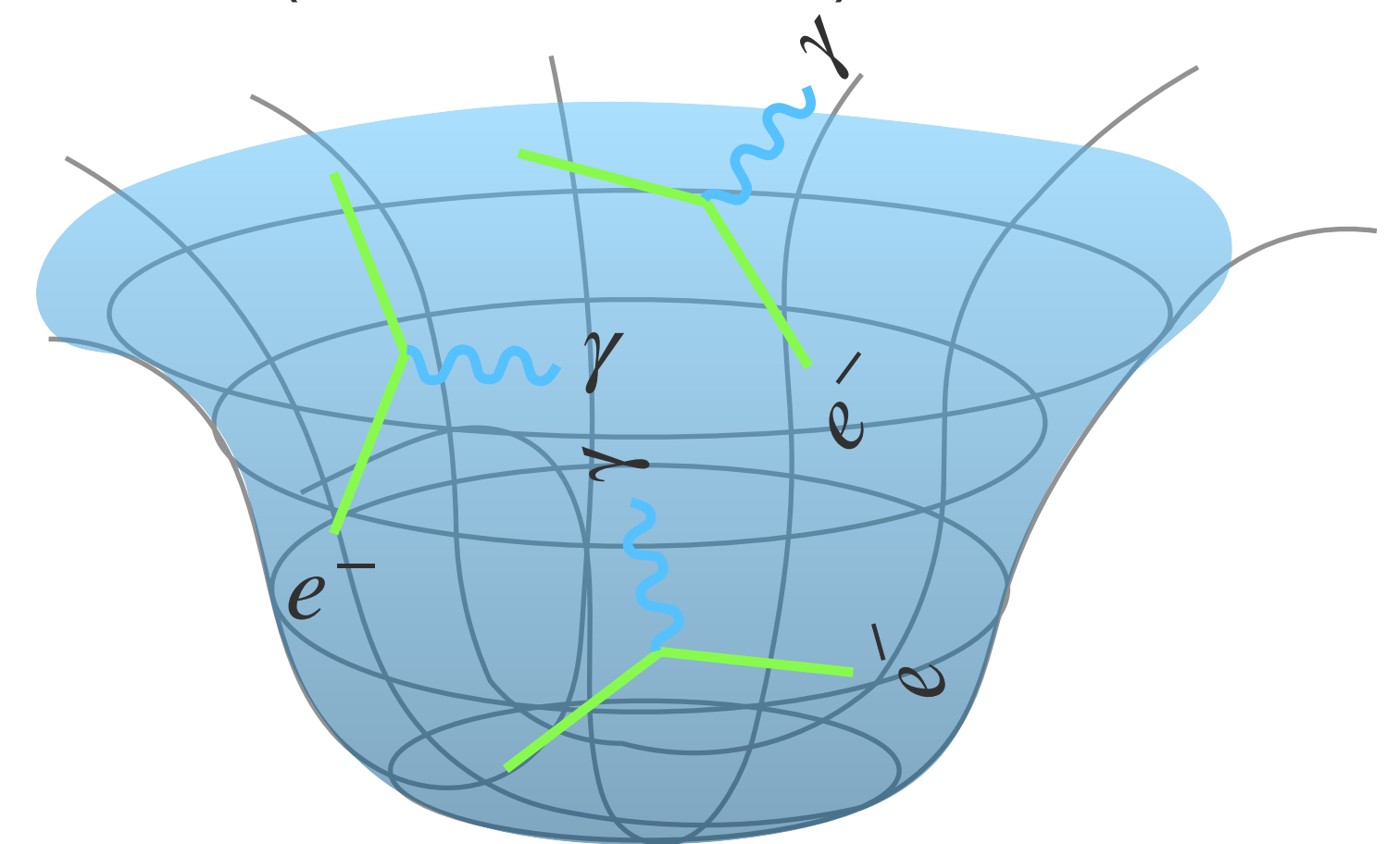
放射 (例: 光子) 物質 (例: 電子) 曲率 宇宙定数

エネルギー比率 (= 宇宙のレシピ) を変えと、宇宙の姿は大きく変化

→ 宇宙がどのようなエネルギー内訳で構成されているか

天文・天体観測から知ることができる 「観測宇宙論」

t : 時刻 ... 微分方程式の変数
 $a(t)$: 膨張因子 ... 解くべき関数
 (≒宇宙の大きさ)



時間・空間 = 容れ物
 物質 (エネルギー) = 材料
 エネルギー比率 = レシピ

宇宙のエネルギー内訳が宇宙の運命を握る
(過去どんな姿だったか・これからどうなるか)

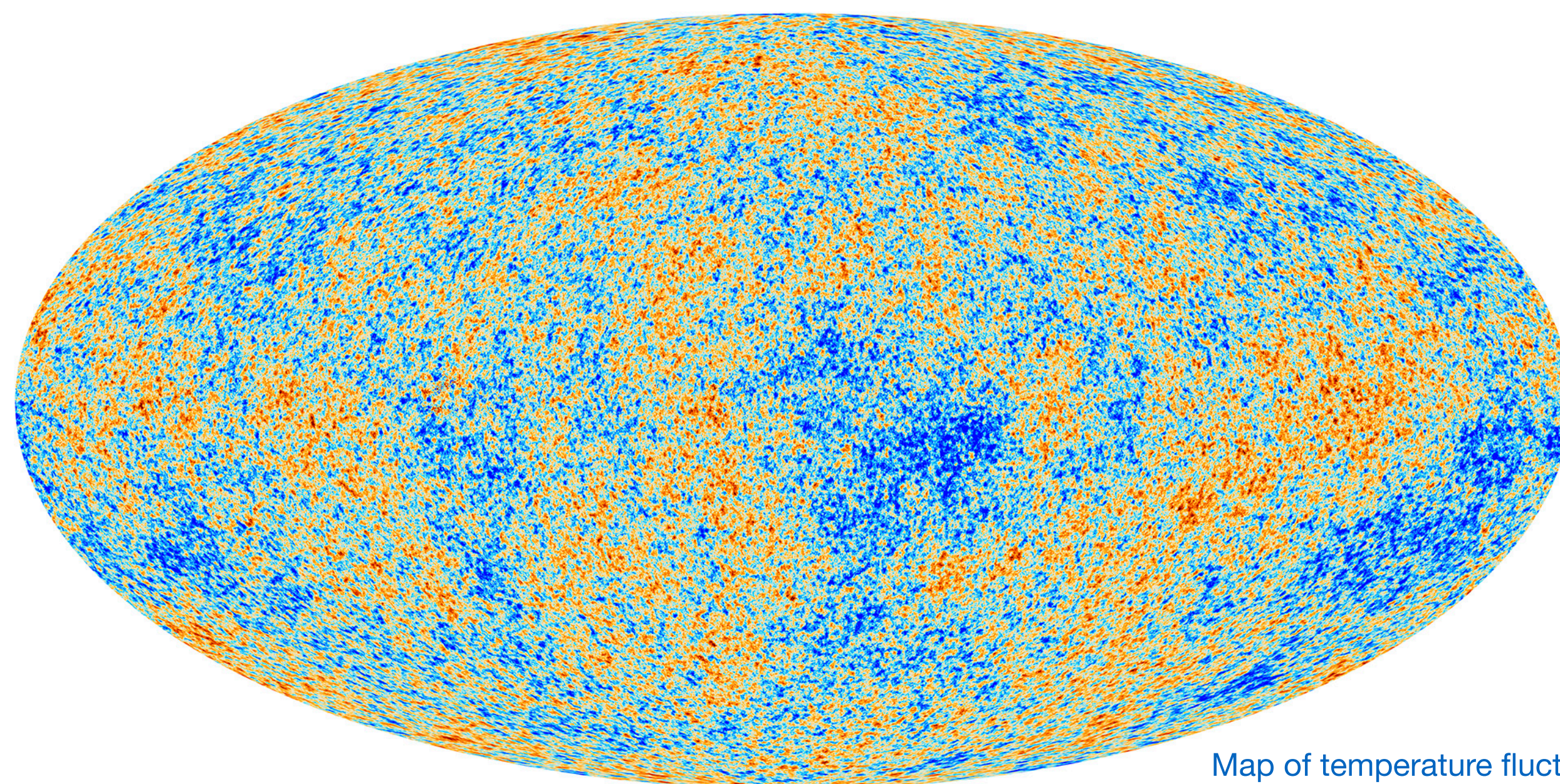
宇宙マイクロ波背景放射

宇宙はじめの光

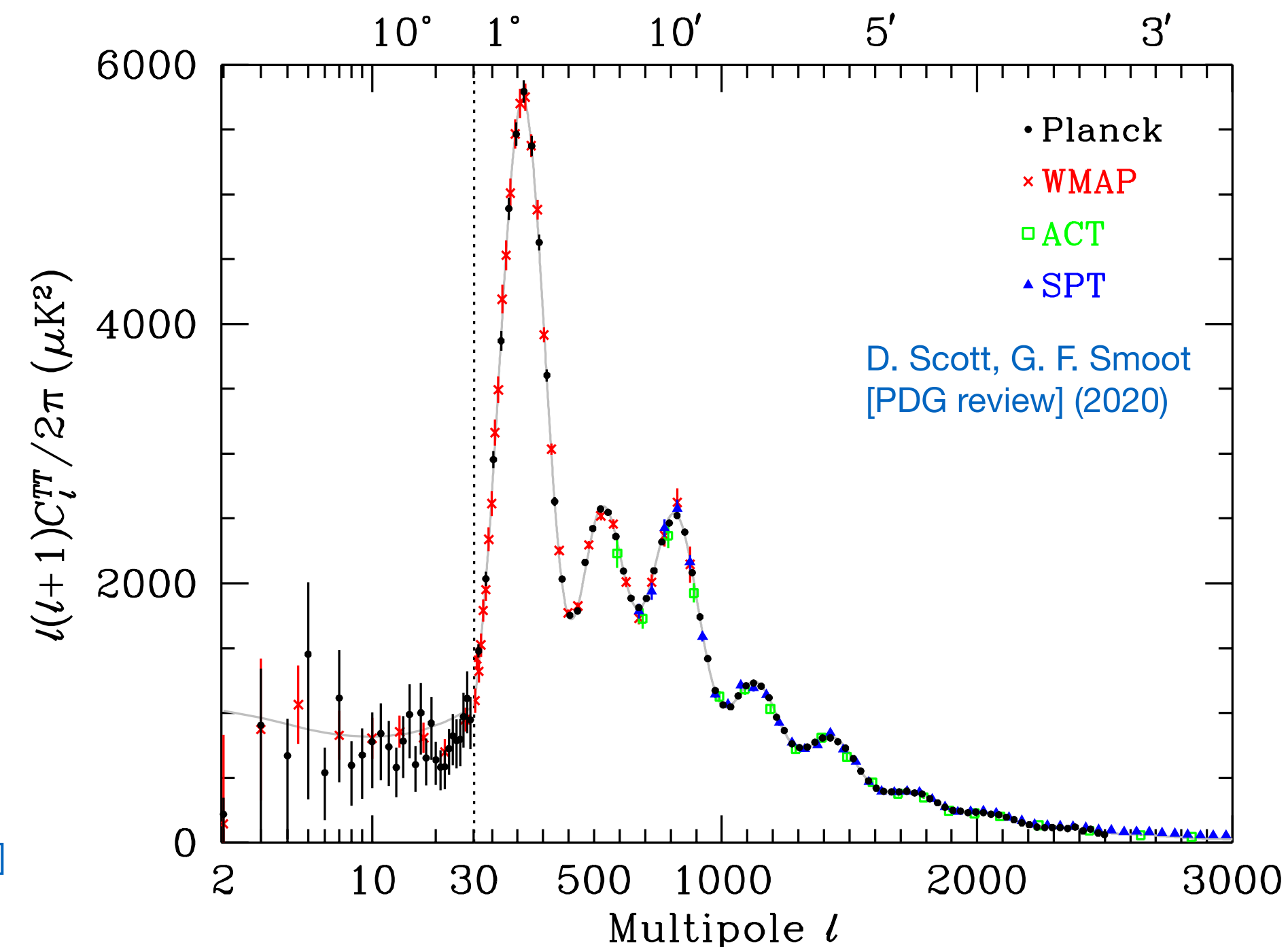
- 私たちが光を通して検知できる「宇宙で一番古い時代の残光」
- 観測事実: ほぼ一様等方、けどほんの少し非等方的 (anisotropy)
- この光のスペクトルは、宇宙のエネルギー比率に強く依存
→ 現状最も良い精度で、宇宙のレシピを教えてくれる

$$T(\theta, \phi) = \sum_{\ell, m} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \phi)$$

球面調和関数による観測データのフィッティング



Map of temperature fluctuation [Planck]



宇宙のエネルギー比率

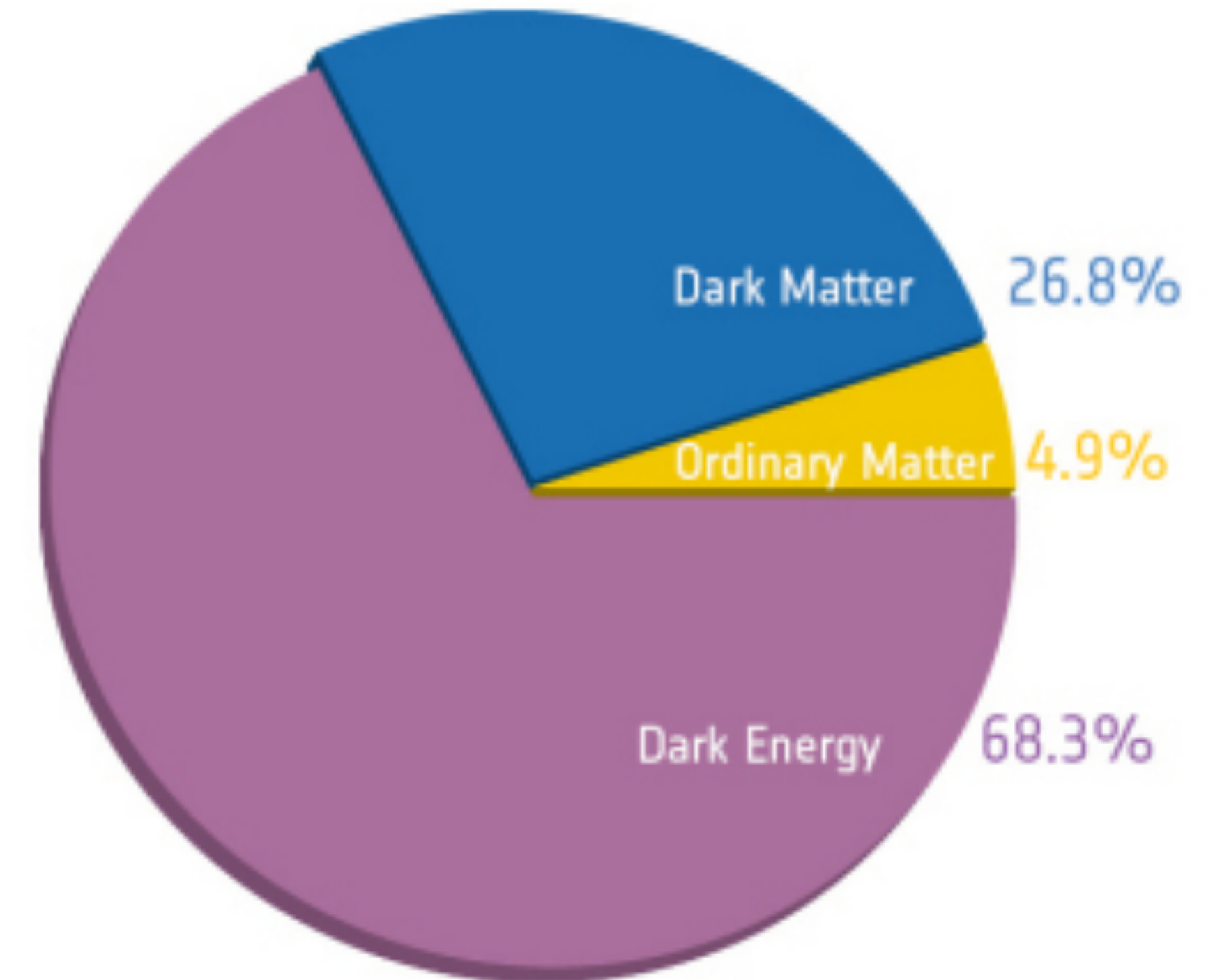
[<https://sci.esa.int/web/planck/-/51557-planck-new-cosmic-recipe>]

結果

- 既知の物質 (= 標準模型粒子) ... 5%
 - 謎の物質 ... 27%
 - 謎のエネルギー ... 68%
- 物質 { 15% : 光る物質
85% : 光らない物質

現状の理解: 物質の相互作用を微視的に記述する理論
= 素粒子標準模型??? (たった5%)

宇宙に存在する「光らない謎の物質」がどんな性質で特徴づけられ
どんな相互作用をするかを知らなければ、
宇宙を構成する物質の相互作用を微視的に解明したとは言えないのでは？



暗黒物質も含めた枠組みで、**物質の相互作用理論**を完成させ、**宇宙現象**を解き明かしたい



暗黒物質

素粒子理論的アプローチ



私の研究テーマ: 「暗黒物質の正体解明」

暗黒物質 = 宇宙に存在する未知の重力源

- 間接的証拠: 銀河の回転曲線、弾丸銀河団、重力レンズ効果による天体像の歪み

[Rubin et al. (1980)]

[Markevich et al. (2002)]

[Oguri et al. (2018)]

[Clowe et al. (2006)]

→ 複数の独立な天文観測が「**光学的には探知できない重力源の存在**」を示唆

(cf. 広島渚さんのセミナー)

暗黒物質に関する現状の理解

- 電氣的に中性
- 安定、あるいは宇宙年齢に比べて長寿命
- 宇宙の構造形成時に非相対論的 = 物質として振る舞う
- 宇宙の全エネルギー密度の約1/4を占める (宇宙背景放射の観測) [N. Aghanim, et al. [Planck Collaboration] (2020)]
- 素粒子標準模型の枠組みには、候補となる粒子が存在しない

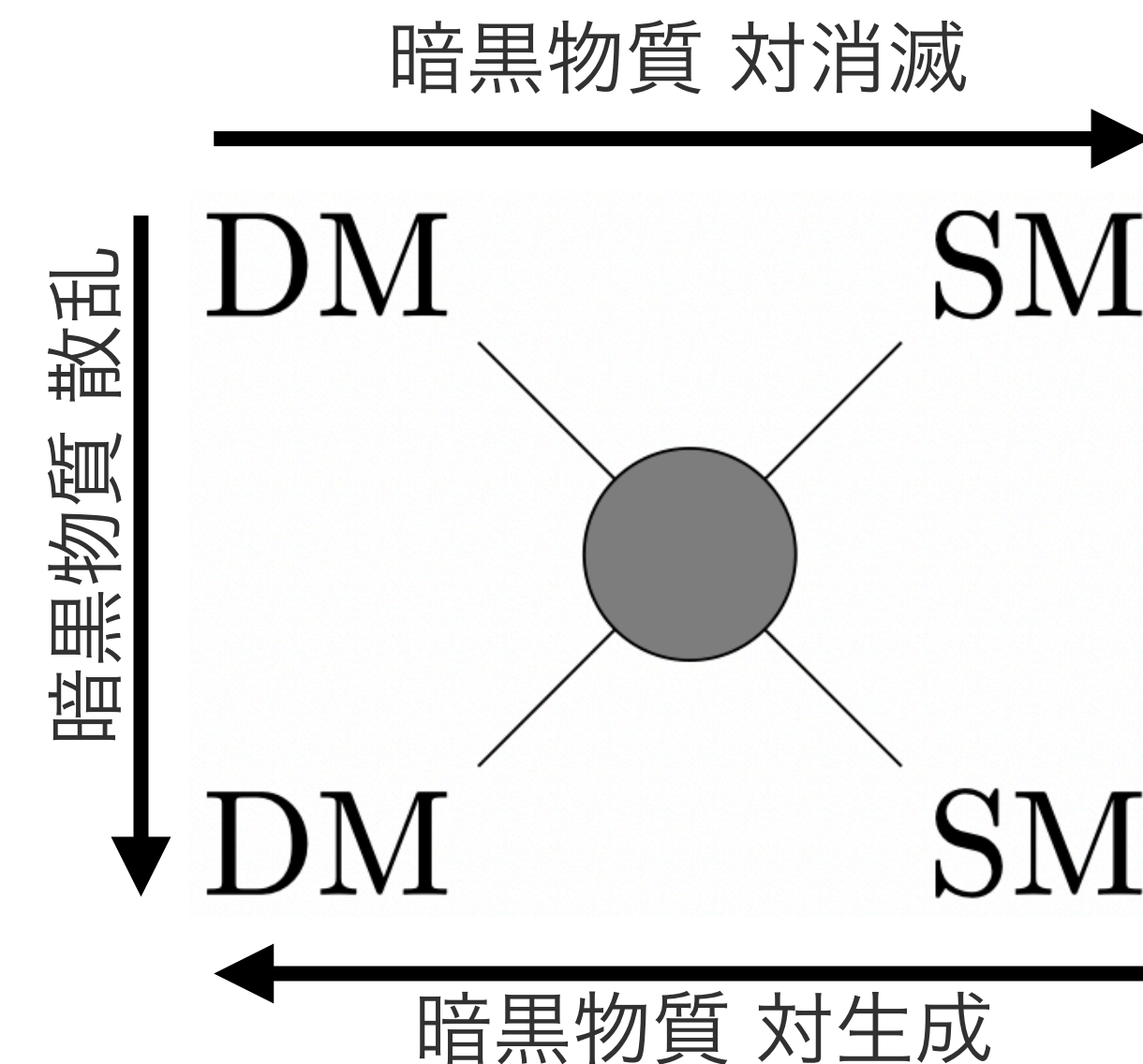
「暗黒物質の正体は何か？」 → 素粒子・宇宙・天体物理学にまたがる未解決問題

素粒子論的な暗黒物質の研究

仮定1: 暗黒物質 = 未知の素粒子

仮定2: 標準模型粒子と「弱く」相互作用

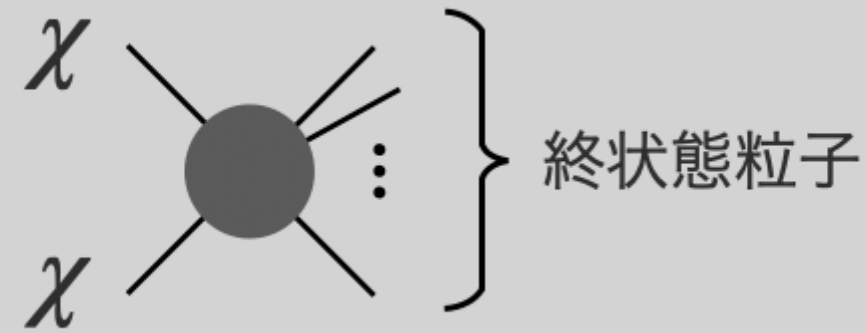
- Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)と呼ばれる候補
- WIMPの特徴
 - 標準模型を拡張した理論において、しばしば予言される
 - 熱い初期宇宙において、暗黒物質は標準模型粒子と熱平衡状態にある
 - 標準模型粒子との相互作用を通して暗黒物質の性質を実験・観測的に検証できる



WIMPが初期宇宙にいるとどんなことが起こるか、シミュレーションしてみよう

下準備1: 暗黒物質 対消滅率

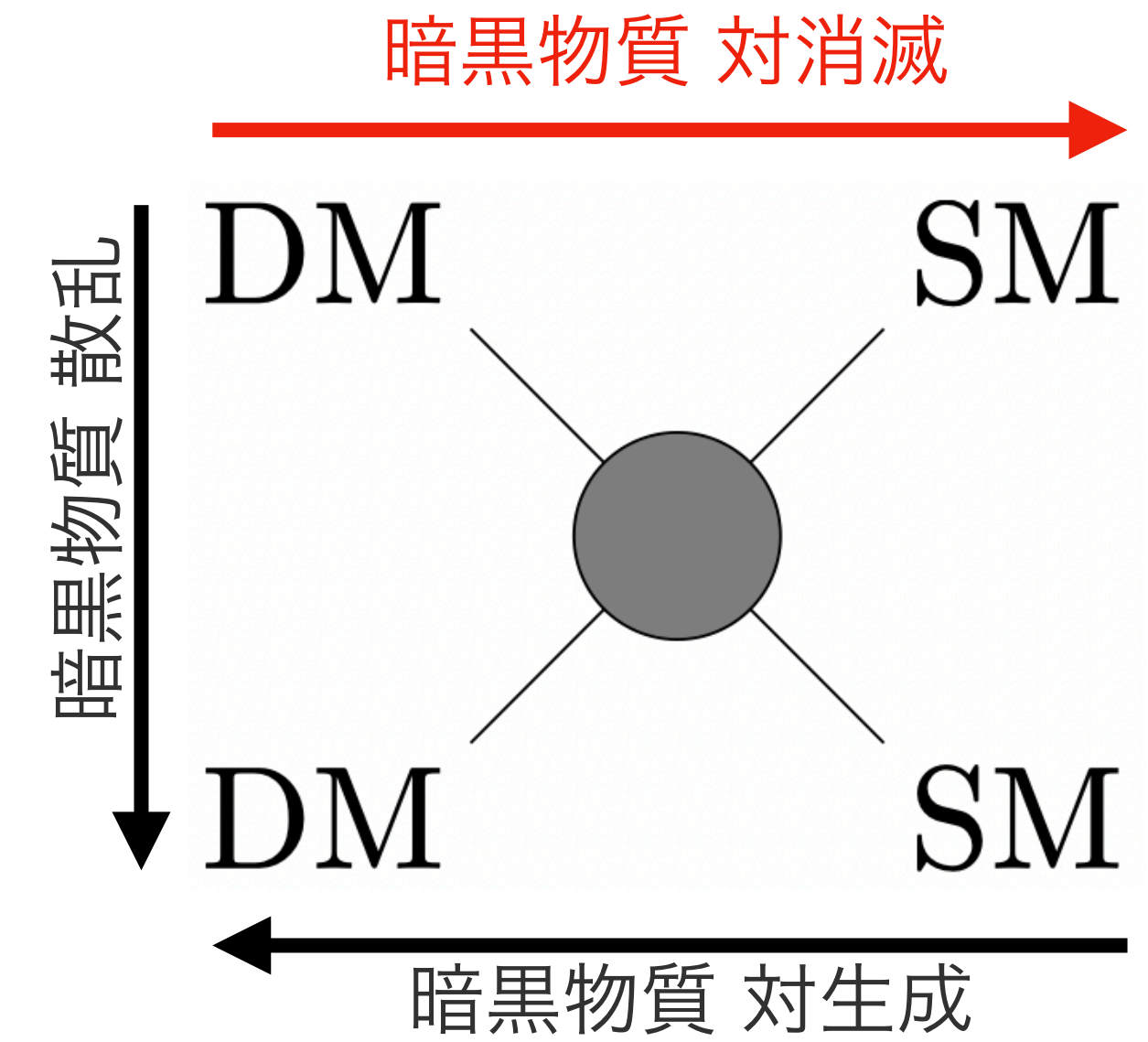
暗黒物質 対消滅過程:



暗黒物質 対消滅振幅:

$$\mathcal{M}_{\chi\chi \rightarrow \text{final}}$$

- それぞれの過程の起こる確率を特徴づける
- 暗黒物質がどんな相互作用を持つかに強く依存



位相空間 (\mathbf{x}, \mathbf{p}) , 内部自由度についての積分

定義式:

$$\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle = \sum_{\text{ann}} \frac{\int |\mathcal{M}_{\chi\chi \rightarrow \text{final}}|^2 (f_{\text{eq}}^\chi)^2 d(\text{phase space})}{(f_{\text{eq}}^\chi)^2 d(\text{phase space})}$$

全ての可能な終状態について足し上げ

熱平衡状態における暗黒物質の分布関数

$$f_{\text{eq},i} = \frac{1}{e^{\frac{E_i}{T}} \pm 1} \sim e^{-\frac{E_i}{T}} \left[\begin{array}{l} E_i : \text{energy of particle} \\ T : \text{temperature} \end{array} \right]$$

下準備2: Boltzmann方程式

暗黒物質数密度の時間発展

$$\frac{dn_{\chi}}{dt} + 3Hn_{\chi} = - \langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle (n_{\chi}^2 - n_{\chi,\text{eq}}^2)$$

暗黒物質数密度の時間変化率
(@膨張宇宙)

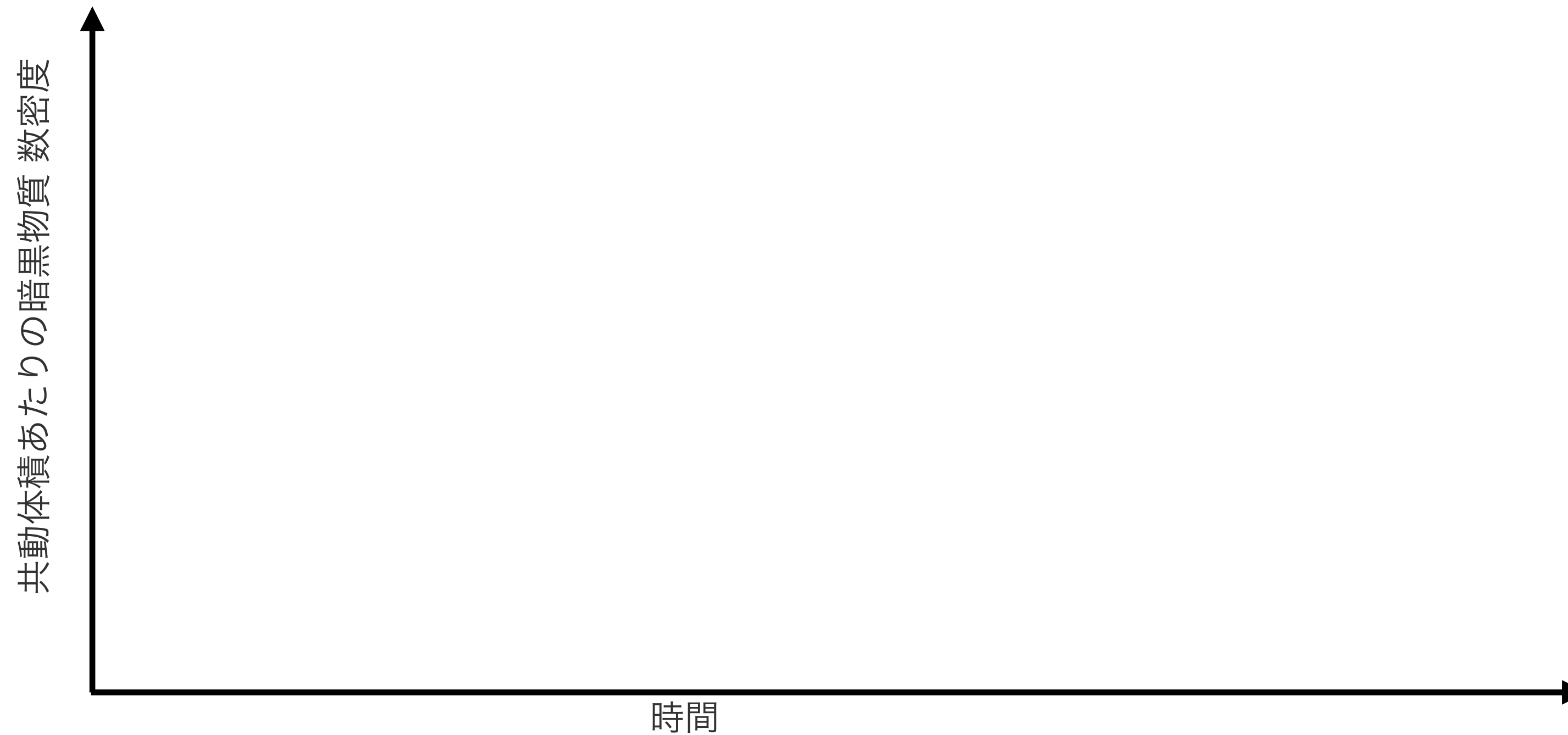
粒子過程による暗黒物質数密度の変化分

- 変化分は対消滅率に比例 $\rightarrow \propto \langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle$
- 暗黒物質が対となって消滅 $\rightarrow \propto (\text{DM \# density})^2$
- 平衡状態ではなにも変化しない $\rightarrow \propto (n_{\chi}^2 - n_{\chi,\text{eq}}^2)$

WIMPシナリオの検証

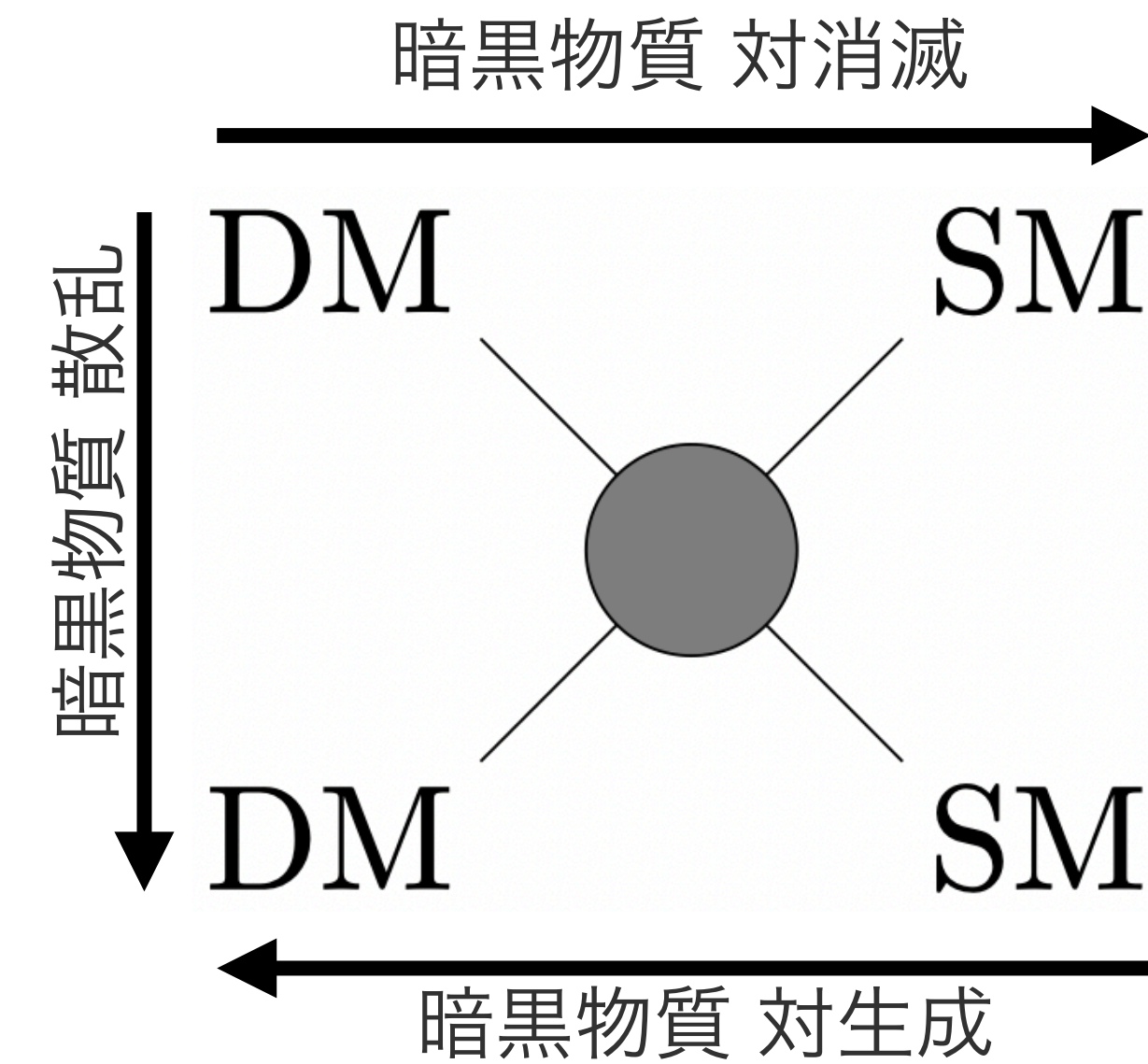
- Boltzmann方程式を解く
- 現在の宇宙における暗黒物質のエネルギー密度が導出できる
 \rightarrow 往々にして、理論の未知パラメータが密度を特徴づける (例: 暗黒物質質量、暗黒物質と標準模型粒子の結合定数)
- 宇宙背景放射の観測から、観測的に支持されるエネルギー密度の値が特定されている
 \rightarrow 観測値を適切に説明することを要請すると、理論の未知パラメータ間に関係がつく (=暗黒物質理論としての予言)
- 予言されたパラメータの関係性を実験・観測的に検証してやることで、暗黒物質の理論としてアリかナシか帰結できる

暗黒物質の熱史

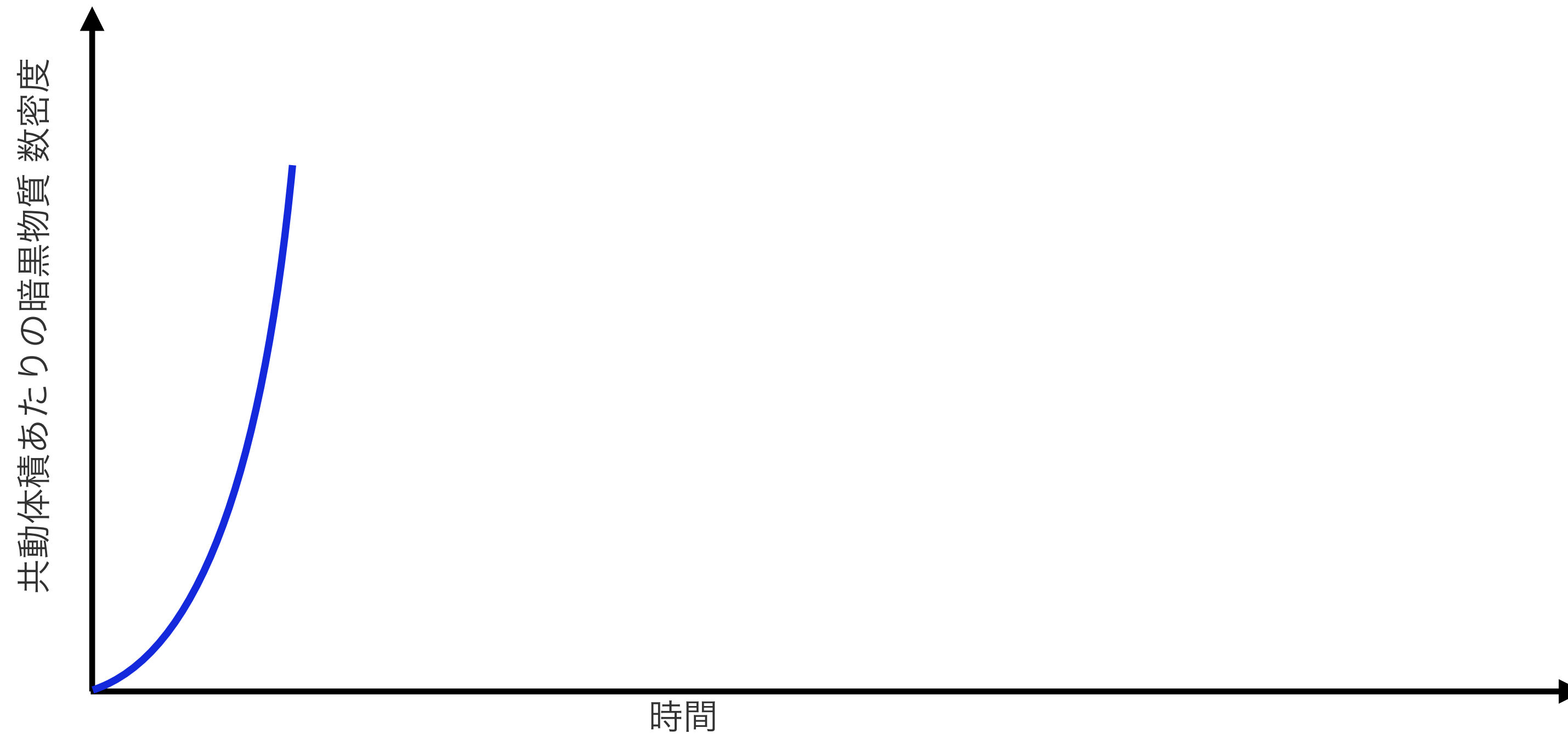


宇宙の歴史は、温度発展(=熱)の歴史

- 宇宙はビッグバンという大爆発によって火の玉のような灼熱状態として生成した、と考えられている
- はじめが最も熱く、あとは断熱膨張で冷え続けていく
→ (時間軸) = (温度の逆数) と見なすことができる

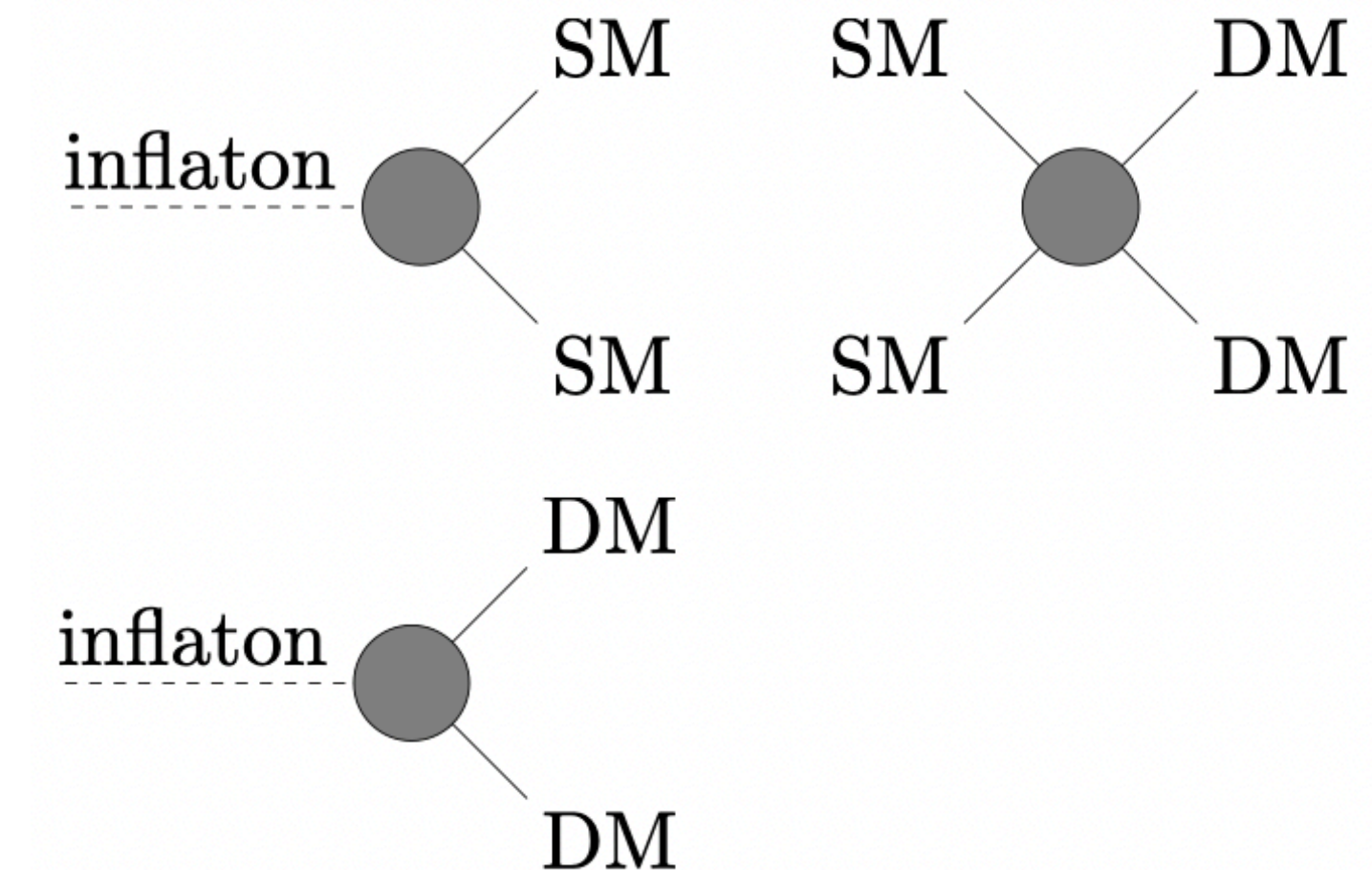
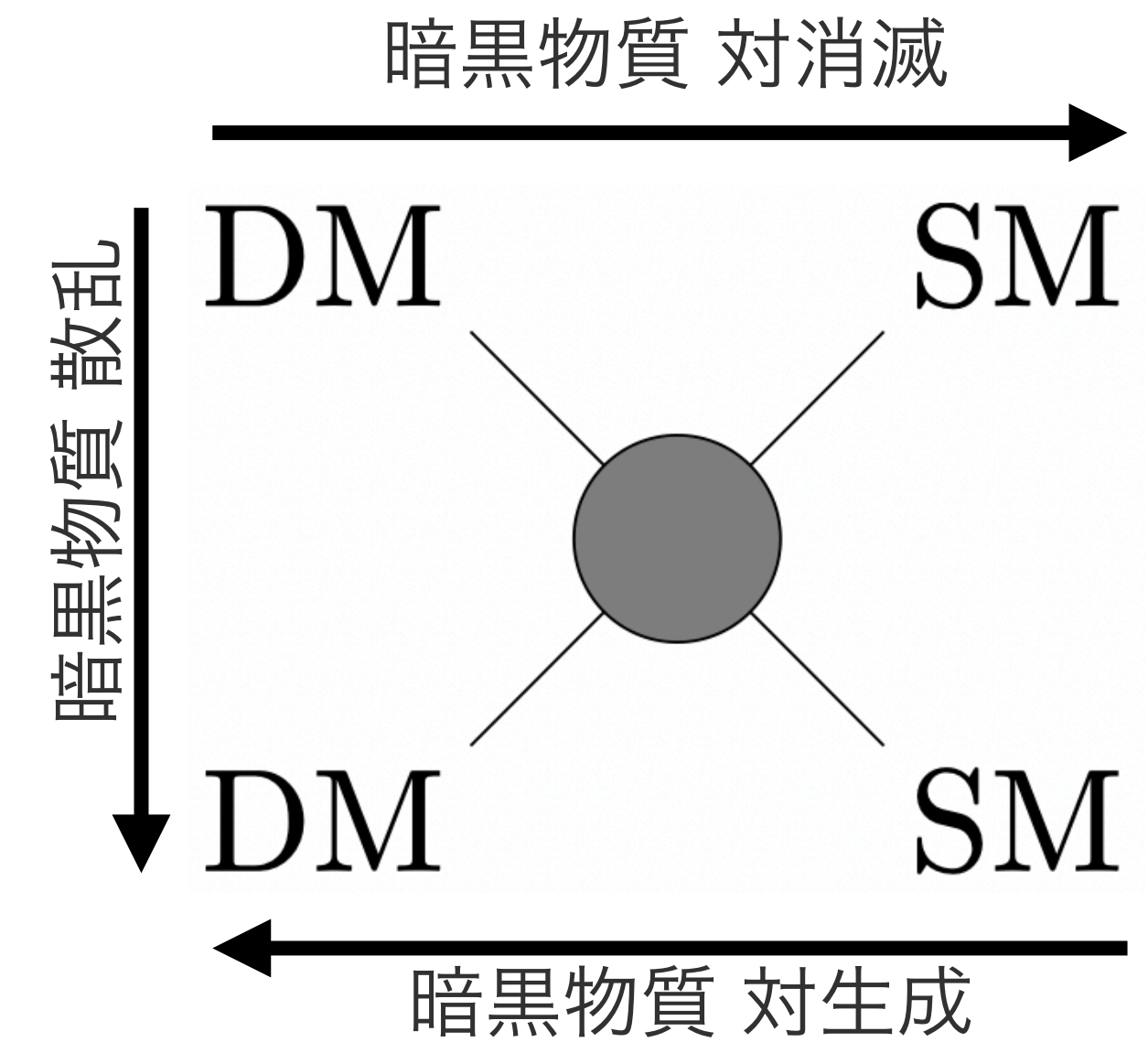


暗黒物質の熱史

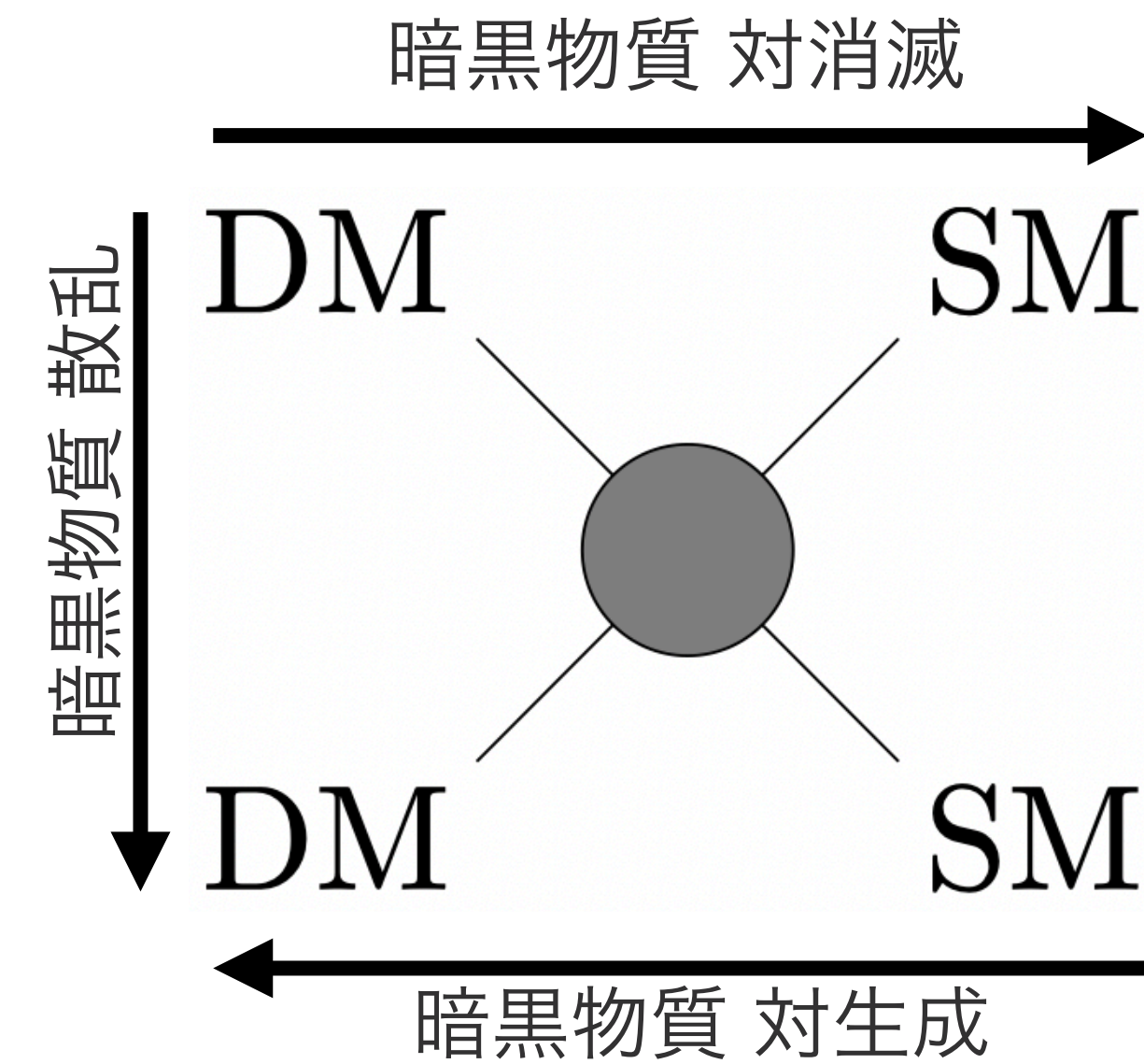
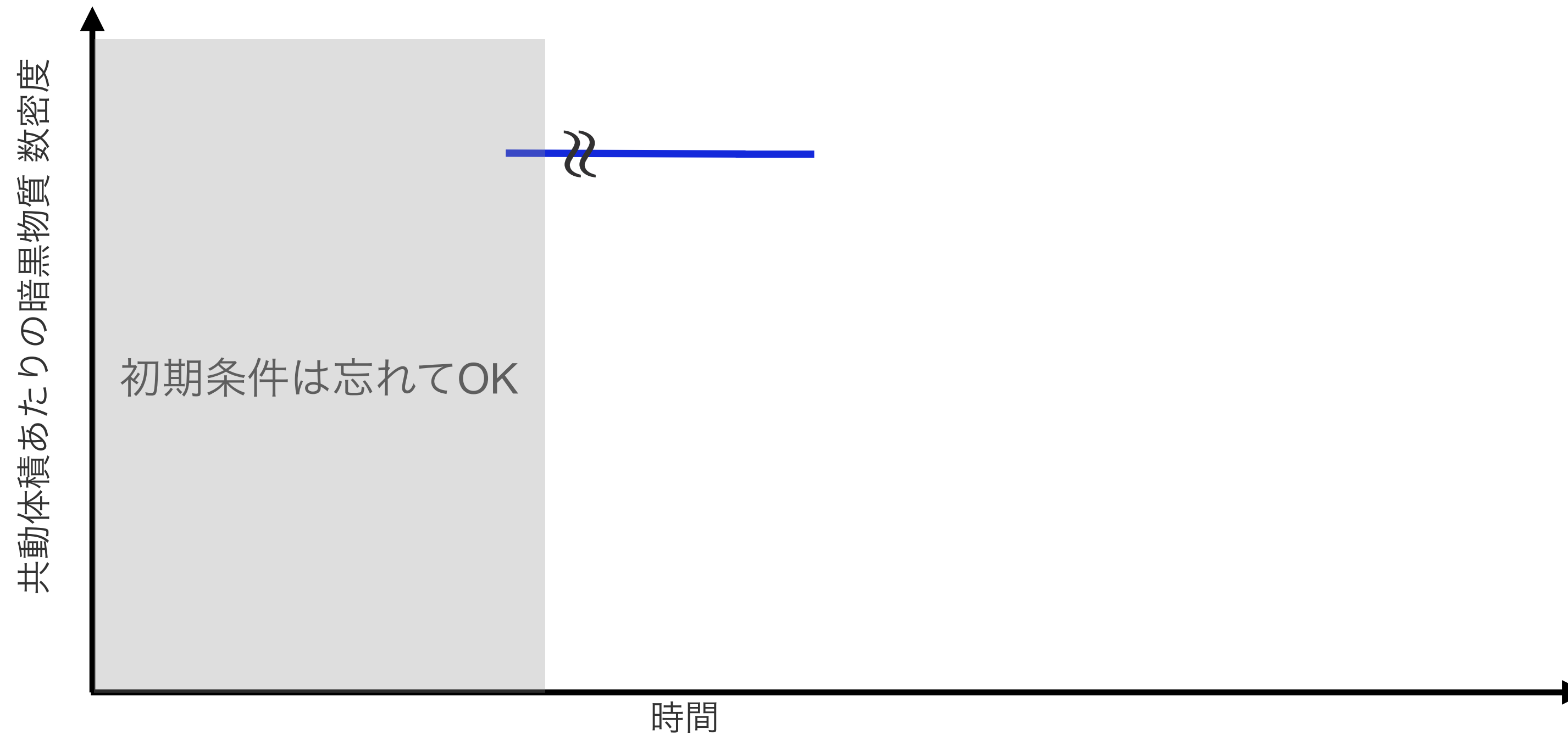


生成期

- 様々な暗黒物質の生成機構があり得る
 - 標準模型粒子から直接 対生成する
 - 宇宙の指数関数的膨張を起こした粒子(=インフラトン)から対生成する
- 様々な可能性があり、正直よくわからない



暗黒物質の熱史



平衡期

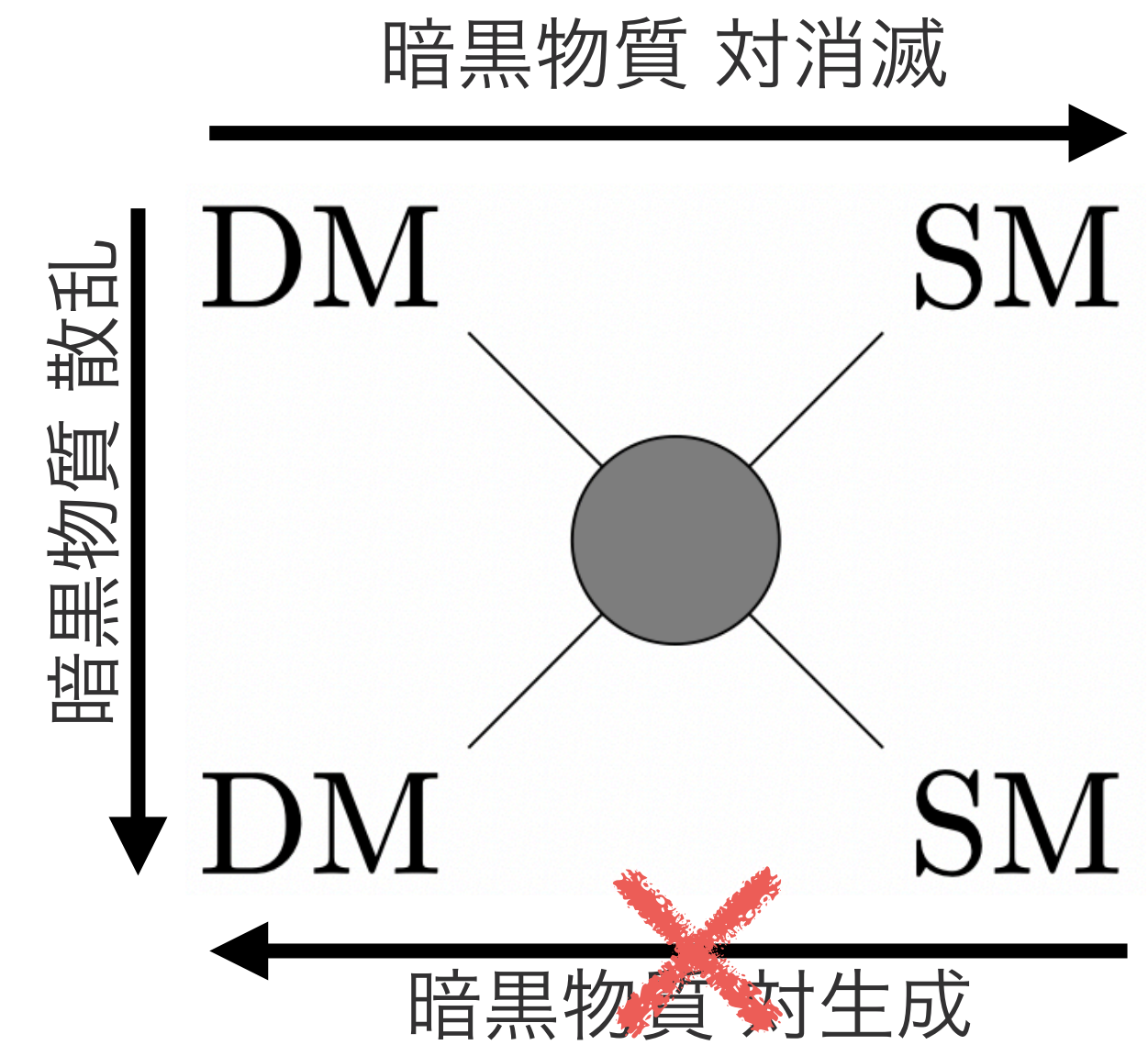
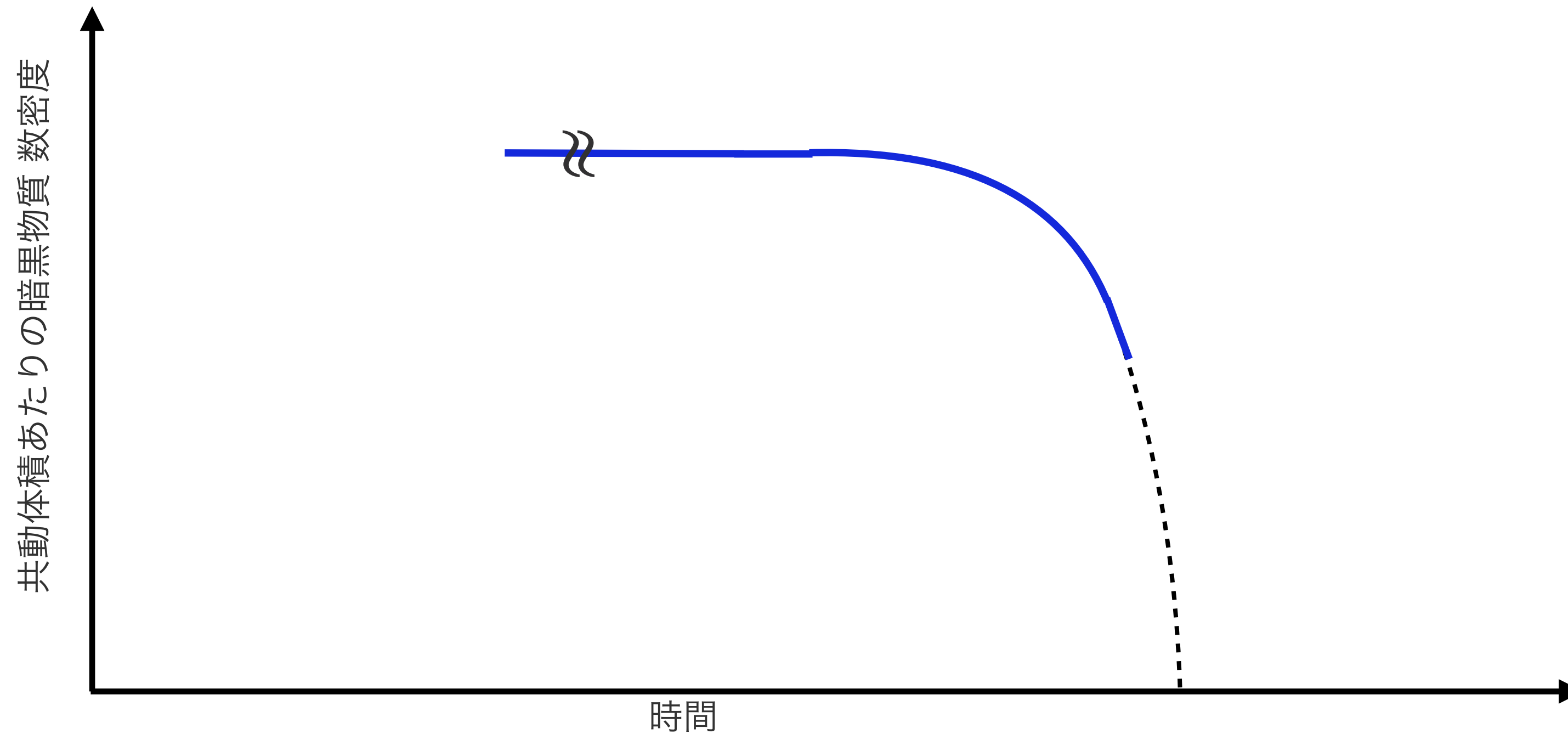
- 暗黒物質は標準模型粒子との相互作用を通して熱平衡状態に至る
- Boltzmann方程式 → 数密度を平衡状態に保とうとする機構を持つ
- 一旦平衡状態に至ると、その前の初期条件は重要ではなくなる
→ 宇宙の初期条件によらない一般的な議論が可能 (長所の一つ)

$$\frac{dn_\chi}{dt} + 3Hn_\chi = -\langle\sigma_{\text{ann}}v\rangle(n_\chi^2 - n_{\chi,\text{eq}}^2)$$

暗黒物質数密度の時間変化率
(@膨張宇宙)

粒子過程による暗黒物質数密度の変化分

暗黒物質の熱史

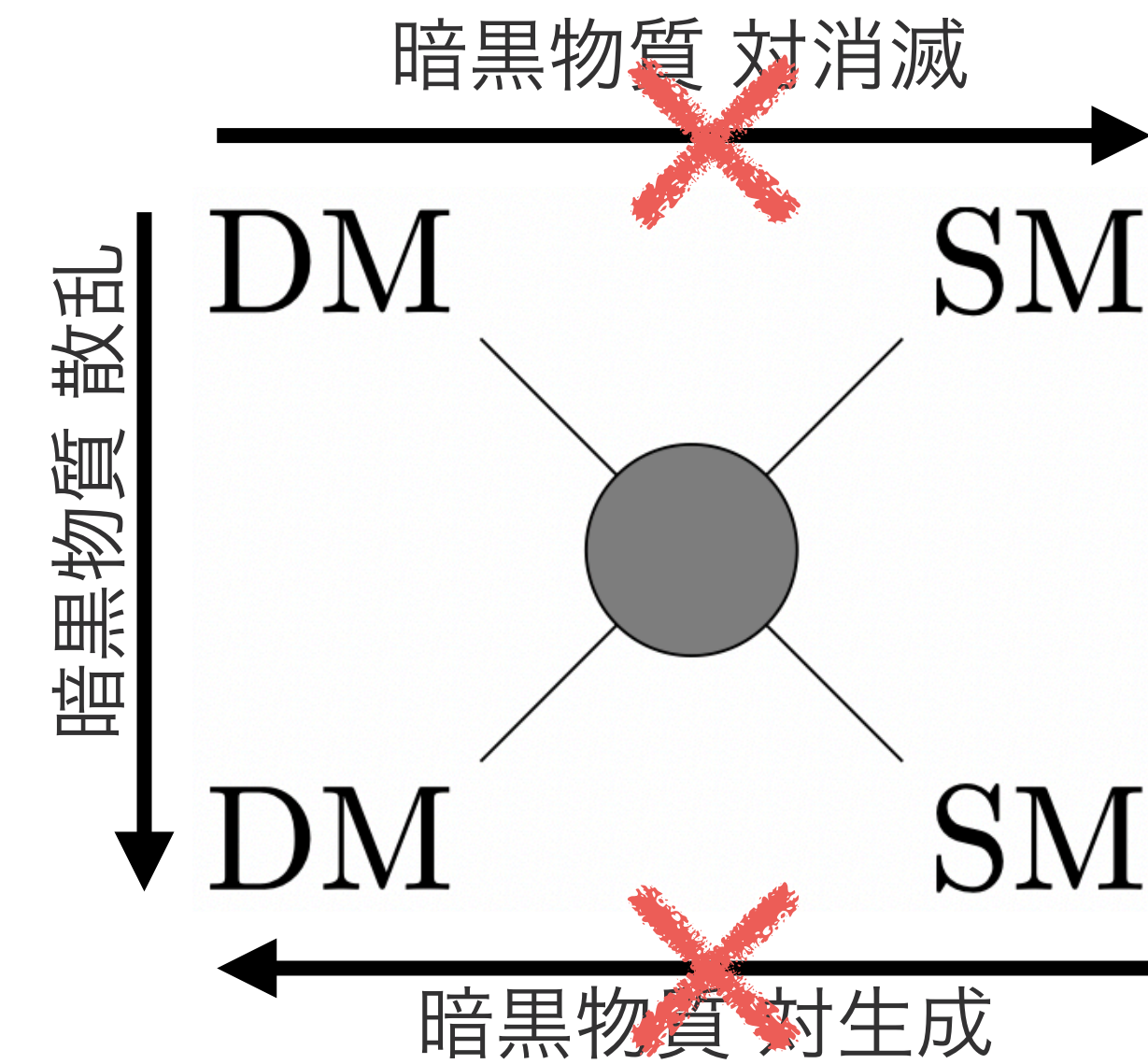
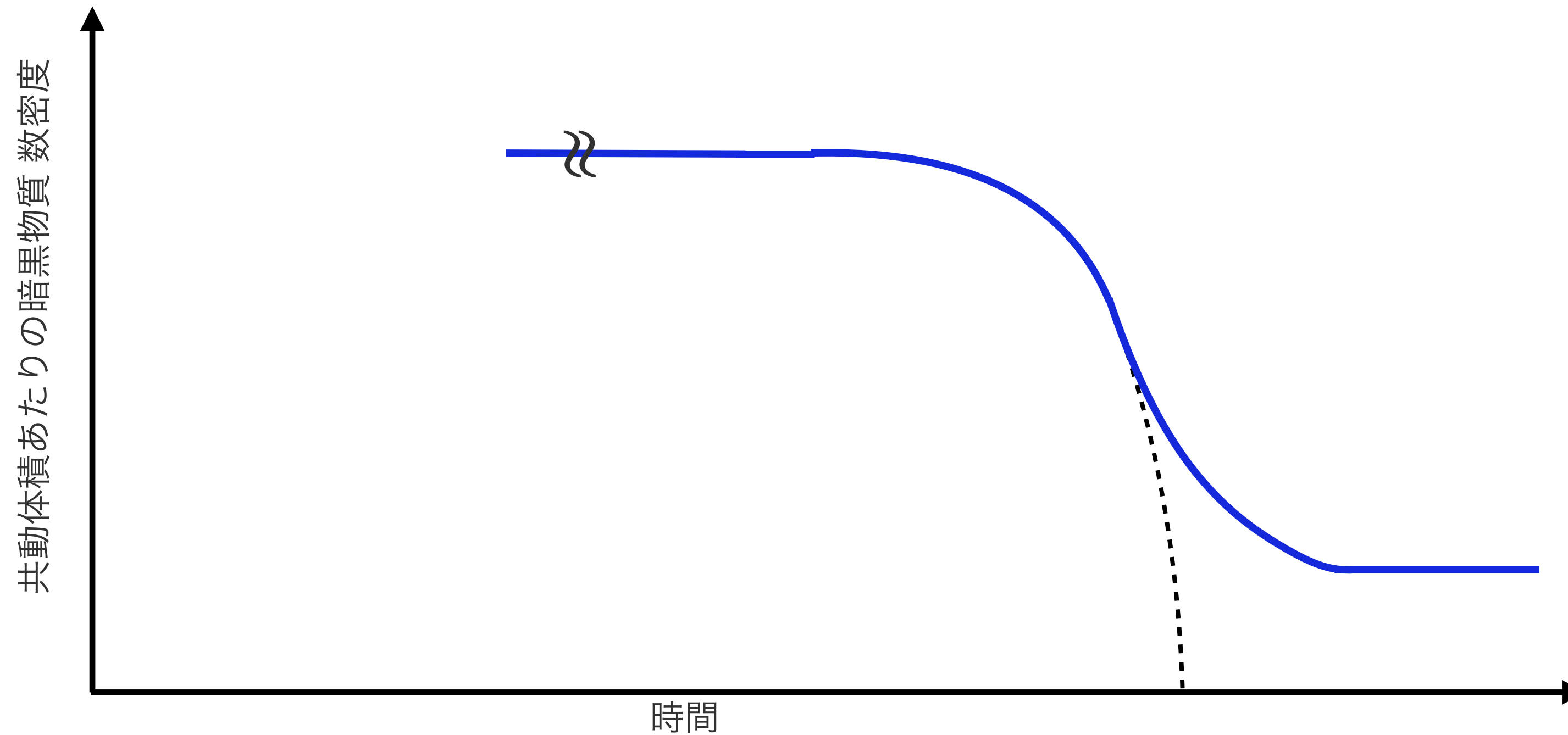


対消滅期

- 宇宙は断熱膨張により、温度が低下し続けていく
- ある時点で、熱浴のエネルギーでは暗黒物質を対生成できなくなる
- 暗黒物質の数は指数関数的に減少していく

$$n_{\chi, \text{eq}} = g \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} e^{-\frac{E_{\chi}}{k_B T}} = \begin{cases} g \left(\frac{m_{\chi} T}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m_{\chi}}{k_B T}} & (m_{\chi} \gg T) \\ \frac{g T^3}{\pi^2} & (m_{\chi} \ll T) \end{cases}$$

暗黒物質の熱史



Freeze-out

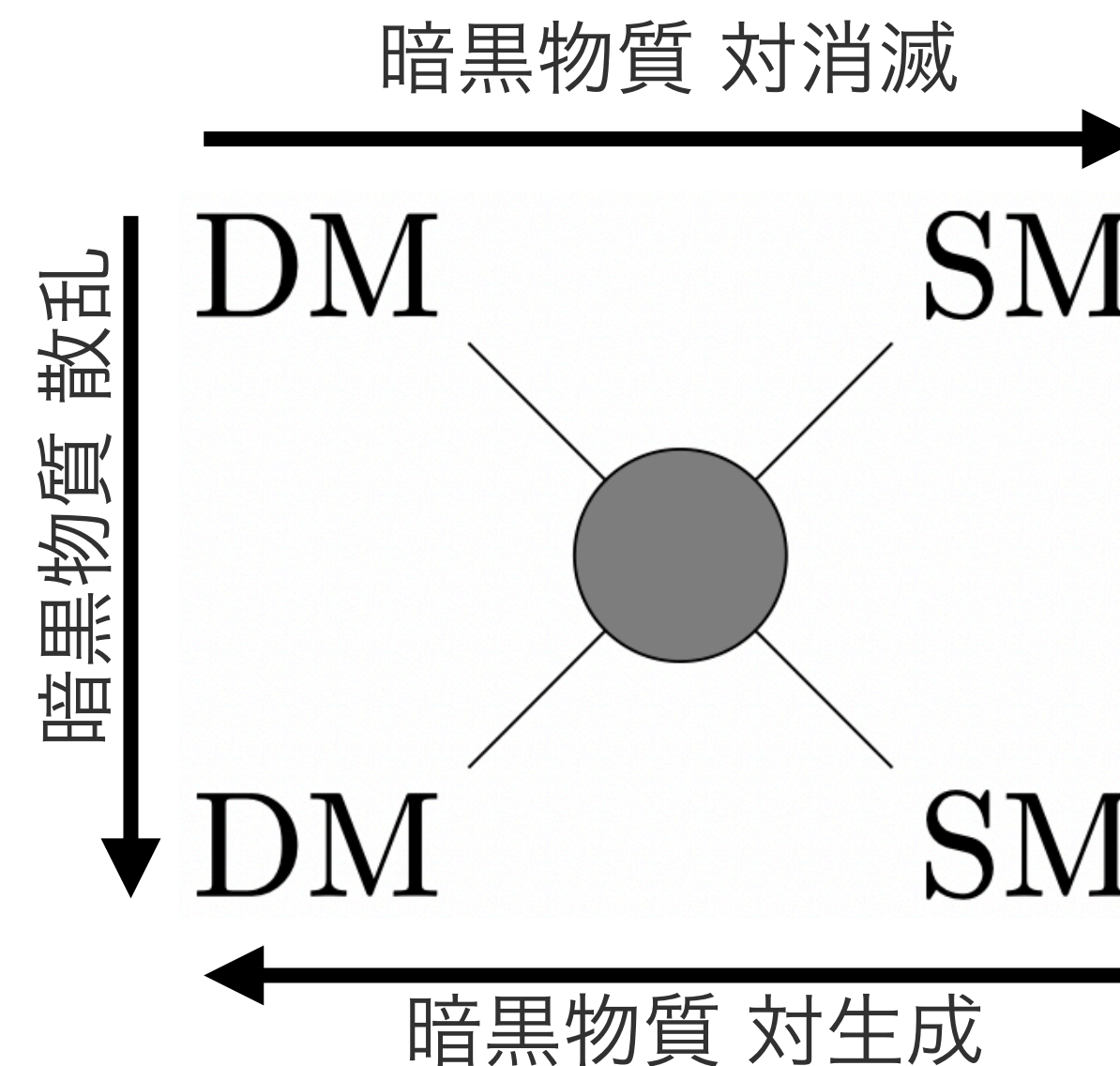
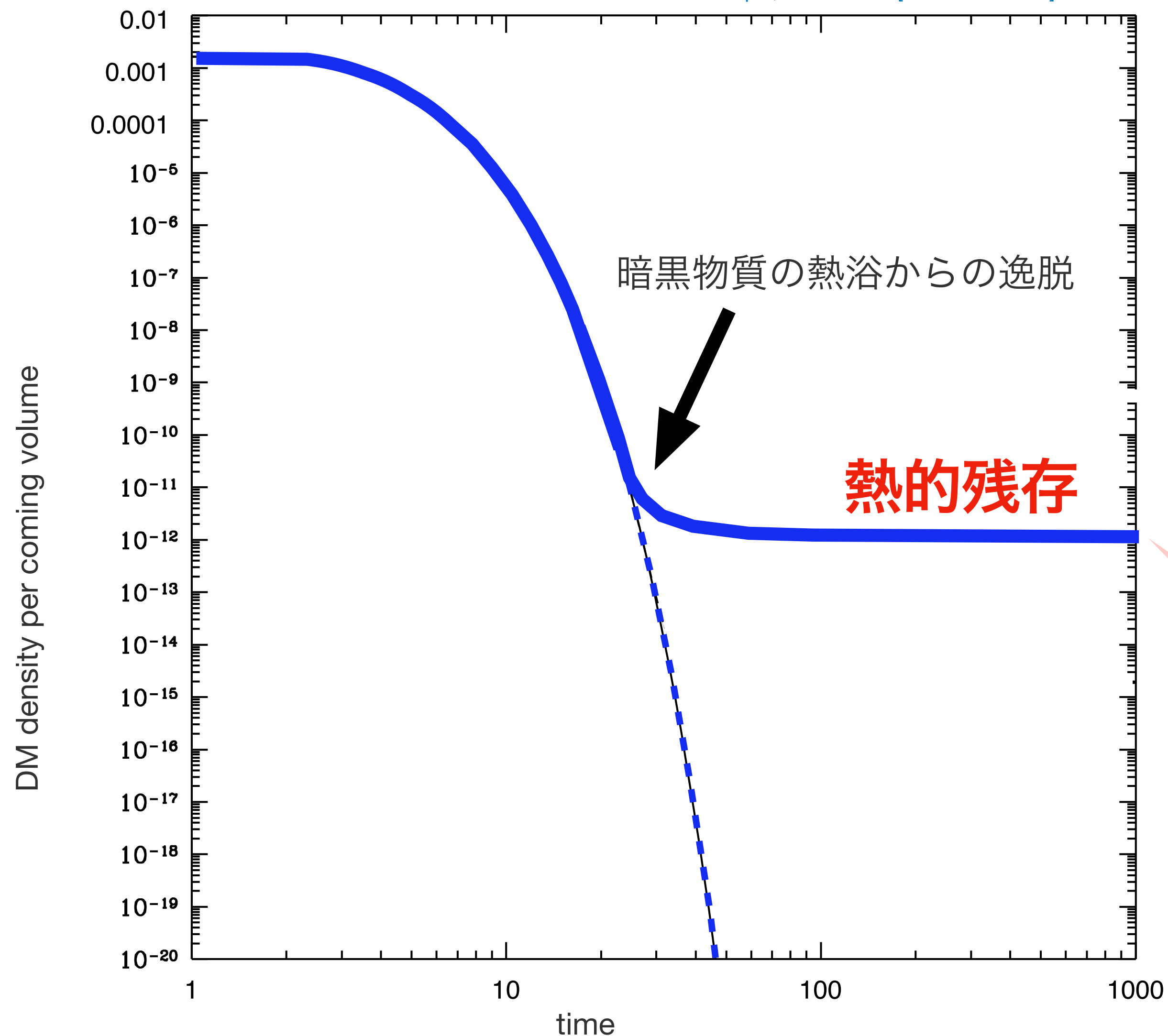
- 宇宙膨張により、暗黒物質は対消滅相手を見つけられなくなる
- 共動体積あたりの暗黒物質数密度は変化しなくなる (=“凍りつく”)
- 現在の宇宙に至る

(宇宙年齢) vs (暗黒物質 対消滅の典型的時間スケール)

$$1/H \stackrel{!}{\simeq} 1/(n_{\chi,eq} \langle \sigma_{ann} v \rangle)$$

暗黒物質の熱史: 帰結

D. Hooper, lecture note [arXiv:0901.4090]



観測から支持される値と適合するには

$$\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle \simeq 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$$

→ 素粒子物理においてどんな相互作用を示唆するか？

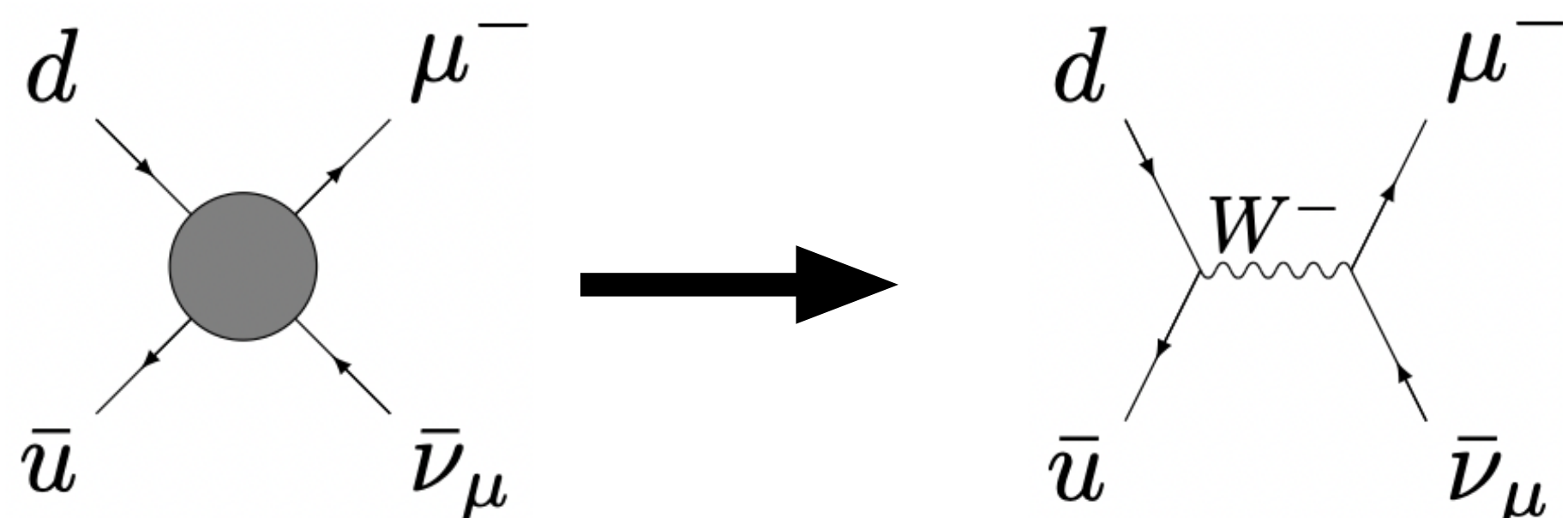
WIMPシナリオが示唆すること

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

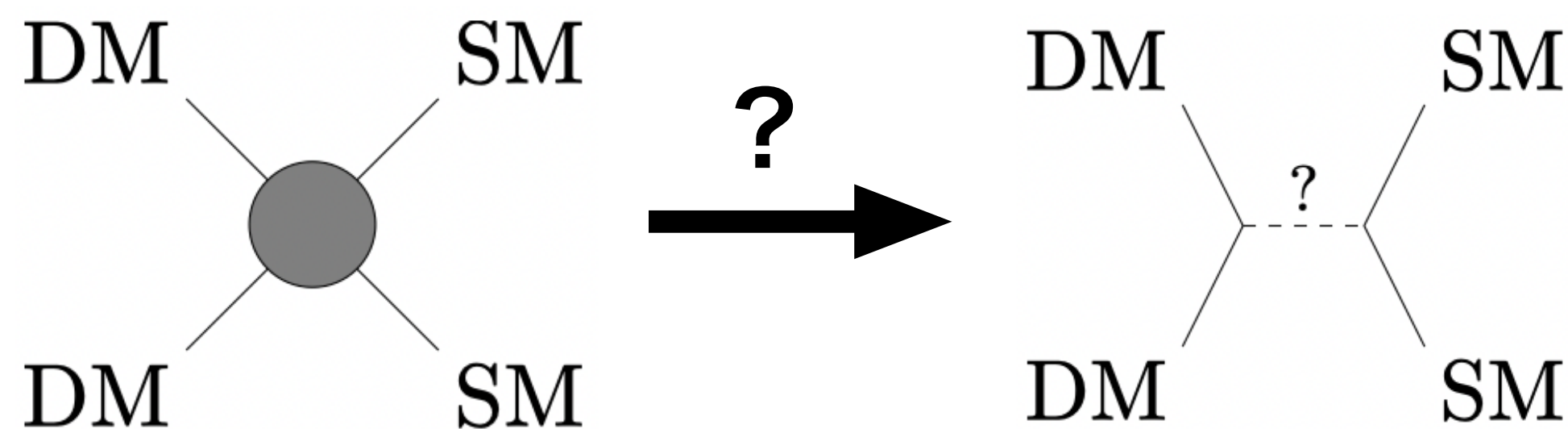
$$1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle \sim 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s} = 1 \text{ pb} \cdot c = \text{素粒子標準模型の弱い相互作用過程に典型的な断面積}$$

弱い相互作用では何が起こっていたか? (eg. 荷電パイオンの崩壊)



電弱ボソンが相互作用を媒介
(W ボソン, $m_W = 80.4 \text{ GeV}$) : 電弱スケール



電弱スケールの媒介粒子?

- ヒッグス粒子?
- Z ボソン?
- 新粒子?

WIMPシナリオを実現する暗黒物質理論?
→ 電弱スケールに新物理 (一つの可能性)

素粒子論的な暗黒物質の研究戦略

※ 概念図

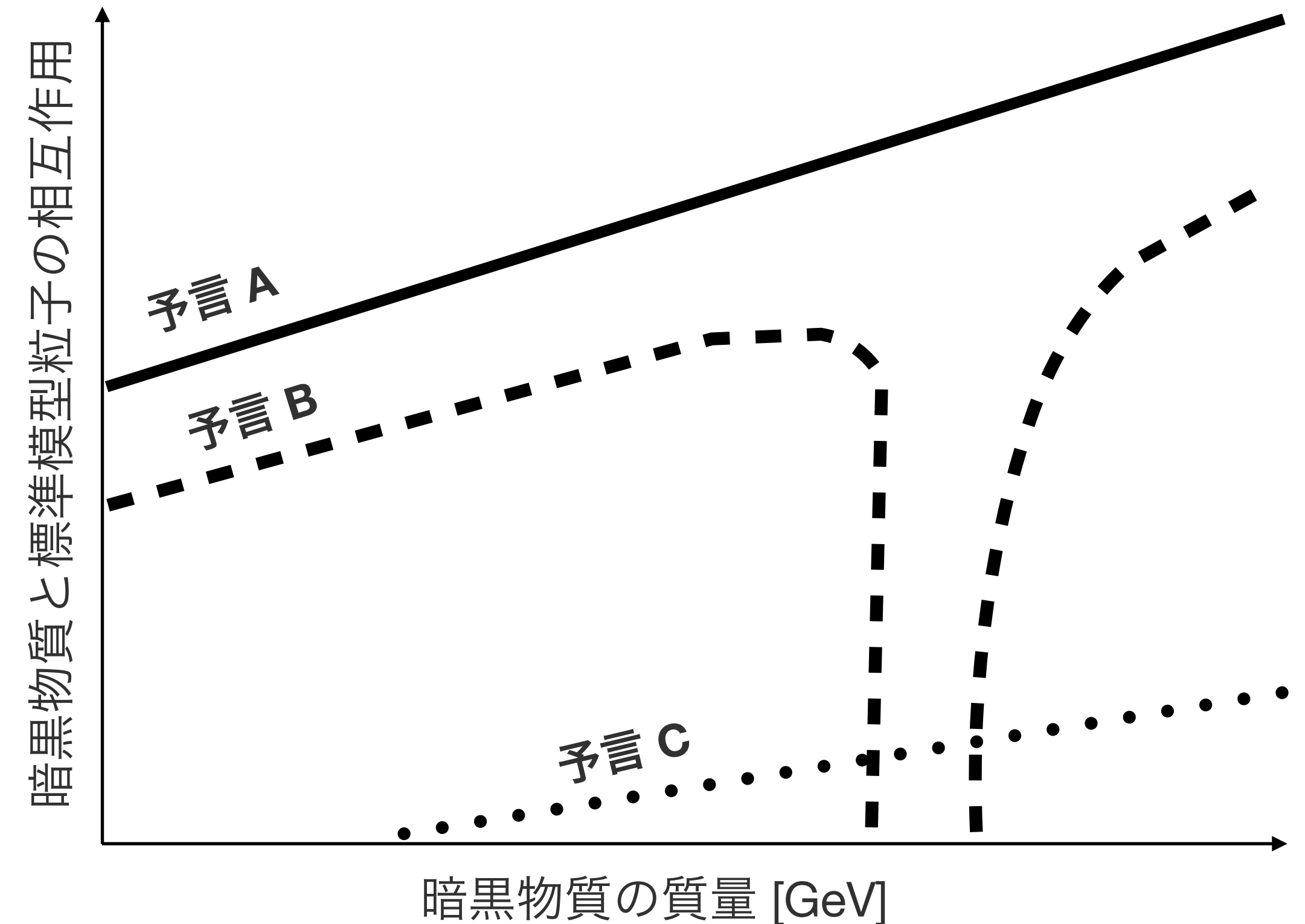
仮説: 暗黒物質 = 未知の素粒子

目標: 暗黒物質の量子数の特定

- 暗黒物質を含めた「物質の相互作用理論」の雛形は暗黒物質の量子数によって特徴づけられる
 - 暗黒物質の質量・スピン
 - 暗黒物質と標準模型粒子との相互作用

暗黒物質の理論的レシピ

- スピンを決める
- 暗黒物質と標準模型粒子がどのように相互作用するか決める
- 膨張宇宙の時間発展方程式を解き、現在の宇宙における暗黒物質のエネルギー密度を計算する
- 観測値を満たすように理論の量子数・パラメータを選ぶ → **質量と相互作用**に関係がつく (= 実験・観測で検証すべき理論予言)



素粒子論的な暗黒物質の研究戦略

※ 概念図

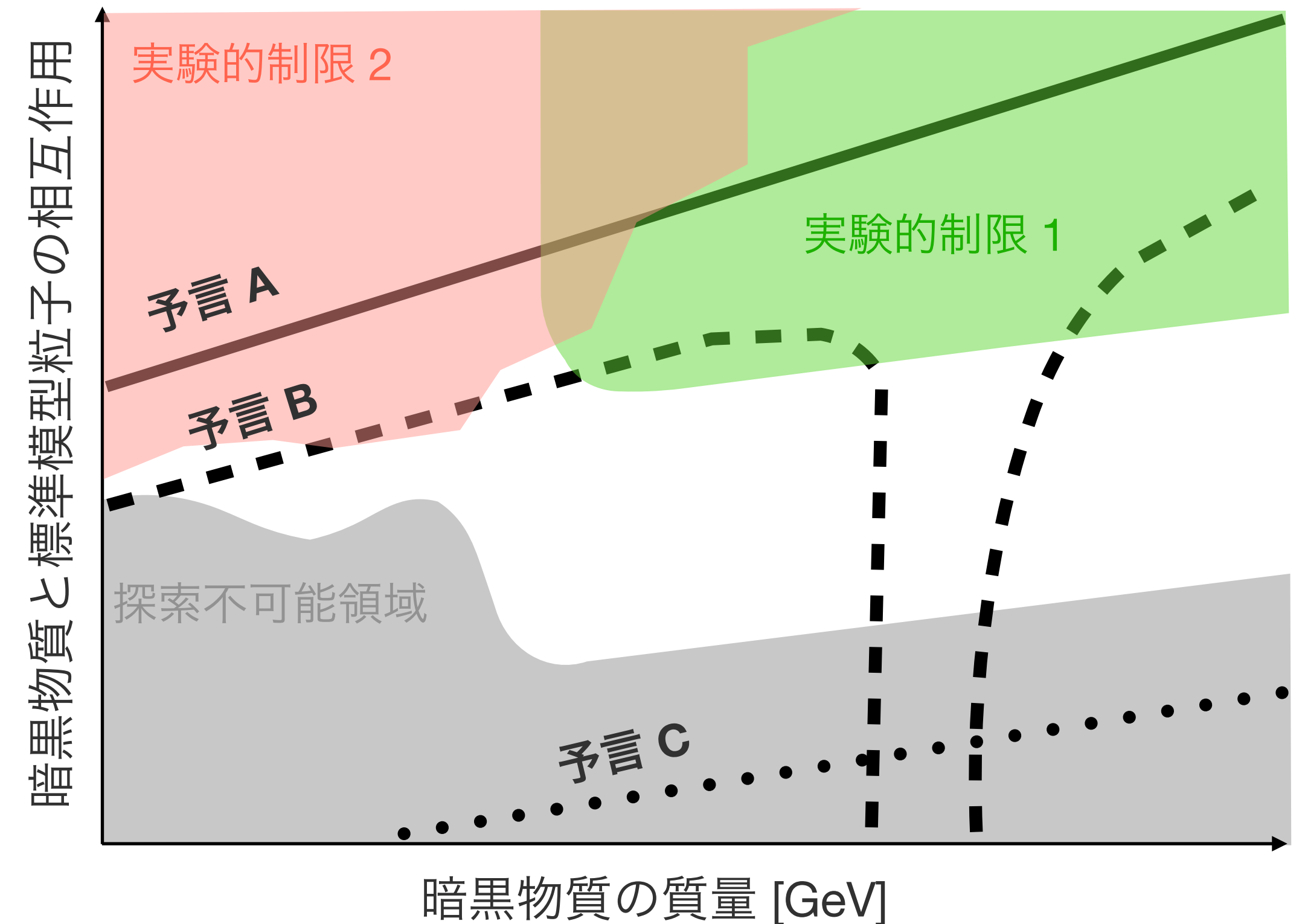
仮説: 暗黒物質 = 未知の素粒子

目標: 暗黒物質の量子数の特定

- 暗黒物質を含めた「物質の相互作用理論」の雛形は暗黒物質の量子数によって特徴づけられる
 - 暗黒物質の質量・スピン
 - 暗黒物質と標準模型粒子との相互作用

研究の方向性

- 暗黒物質の理論模型を構築し、予言を導き出す
- 実験・観測結果に照らして検証する
- 暗黒物質の新しい探索可能性を開発する



三つの軸をバランスよく研究していくことが必要
実験・理論 双方の知見が必要不可欠



暗黒物質

研究の最先端



素粒子論的な暗黒物質の研究戦略 [再掲]

※ 概念図

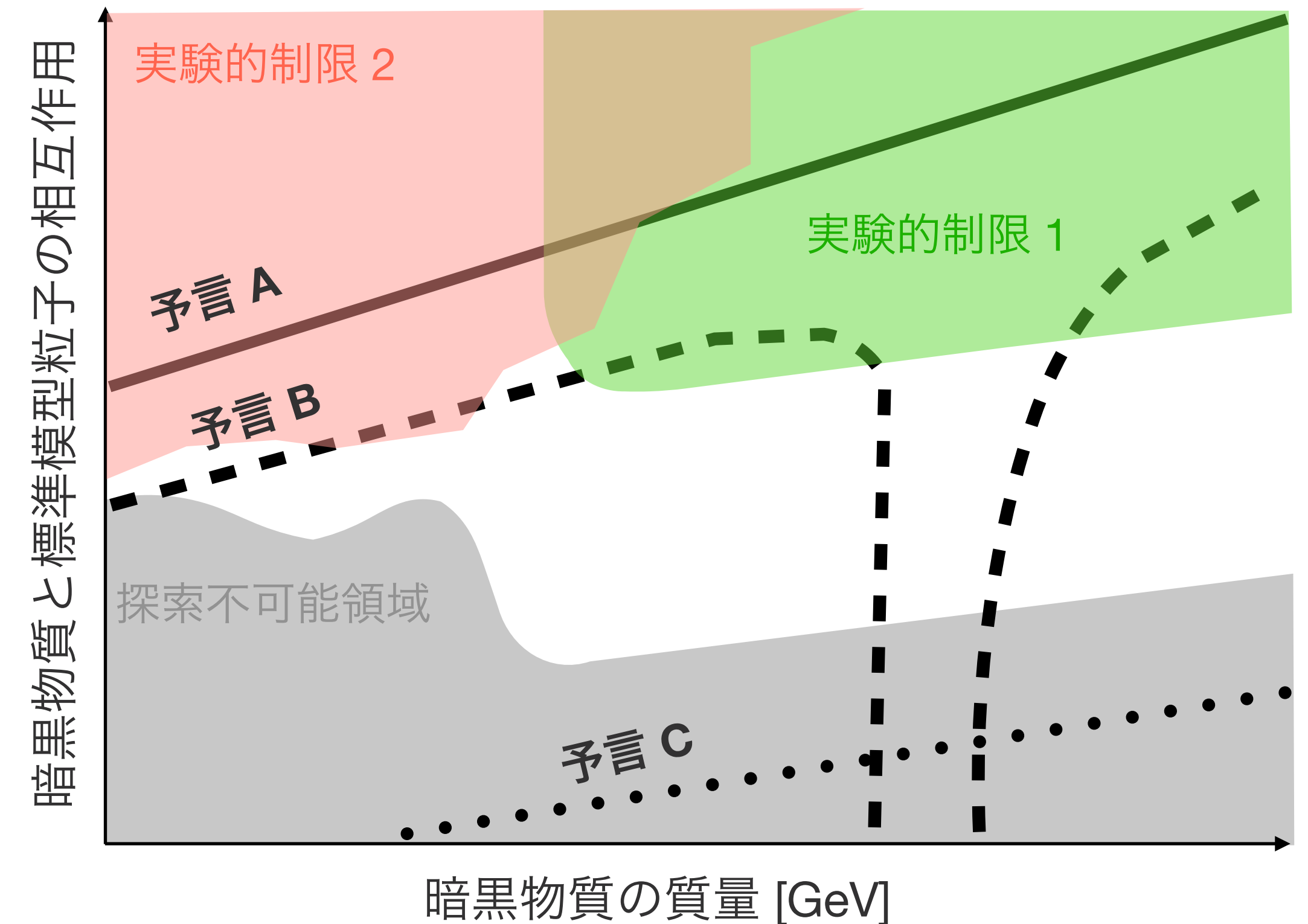
仮説: 暗黒物質 = 未知の素粒子

目標: 暗黒物質の量子数の特定

- 暗黒物質を含めた「物質の相互作用理論」の雛形は暗黒物質の量子数によって特徴づけられる
 - 暗黒物質の質量・スピン
 - 暗黒物質と標準模型粒子との相互作用

研究の方向性

- 暗黒物質の理論モデルを構築し、予言を導き出す
- 実験・観測結果に照らして検証する
- 暗黒物質の新しい探索可能性を開発する



最近、暗黒物質を研究する人たちは何を目指して研究しているのか？

もう少し解像度を高くして鳥瞰してみる

最近の傾向



新しいシナリオの提唱

暗黒物質の新しい生成メカニズムを考えることで
理論パラメータに対する新しい予言を引き出す

例: 粒子過程を変える → 素粒子物理の腕の見せ所
熱史を変える → 宇宙論と関連

理論予言の精密化

実験精度に対し、十分な精度で理論予言を確立する
「非摂動的な補正の評価」がしばしばポイントとなる
→ 精密計算技術・有効理論の構築手法などに関連

新しい探索手段の開発

理論の検証可能性を向上させる上で不可欠な努力
探索対象の物理を理解することが重要
→ 原子核・天文・天体・物性物理等と関連

暗黒物質の模型構築・現象論の研究は、これらの文脈の中でが行われることが多くなってきた

最近の傾向



理論予言の精密化

実験精度に対し、十分な精度で理論予言を確立する
「非摂動的な補正の評価」がしばしばポイントとなる
→ 精密計算技術・有効理論の構築手法などに関連

新しいシナリオの提唱

暗黒物質の新しい生成メカニズムを考えることで
理論パラメータに対する新しい予言を引き出す
例: 粒子過程を変える → 素粒子物理の腕の見せ所
熱史を変える → 宇宙論と関連

新しい探索手段の開発

理論の検証可能性を向上させる上で不可欠な努力
探索対象の物理を理解することが重要
→ 原子核・天文・天体・物性物理等と関連

暗黒物質の模型構築・現象論の研究は、これらの文脈の中でが行われることが多くなってきた

暗黒物質 精密計算の最前線

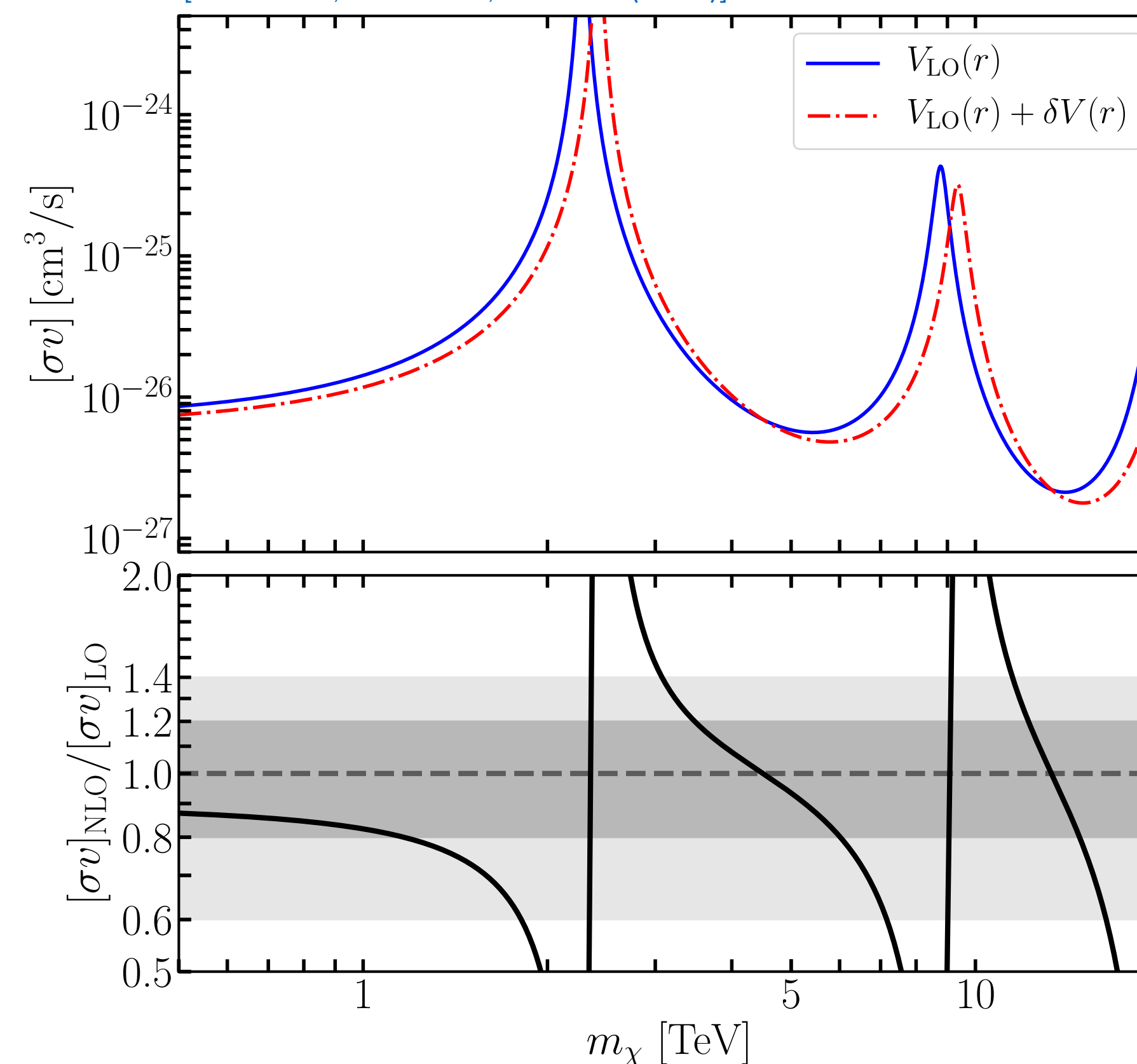
精密化が重要な局面

- 原理的には**すべての状況**
私たちは、暗黒物質を精密に調査してその正体が知りたい
- 共鳴現象などに起因し、予言値が小さい補正で大きく変化する場合
例: 対消滅におけるしきい値共鳴効果 [cf. シンポジウム@広島学会]
- 識別したい複数の理論予言がある場合
識別対象の理論の性質が似ているほど挑戦的

例: 電弱三重項の暗黒物質の**スピンの識別**

- 標準模型を超える理論でしばしば予言される
 - 超対称性 Wino 暗黒物質 (電弱三重項、**スピン1/2**)
 - 余剰次元理論 Kaluza-Klein 暗黒物質 (電弱三重項、**スピン1**)
- 相互作用はほぼ同じで、スピンだけ異なる、実験的シグナルは類似する傾向 → **理論予言の精密化が非常に重要**

[M. Beneke, R. Szafron, K. Urban (2019)]



Multi-energy system

運動学: 重たい暗黒物質の対消滅

- **Hard** な始状態 : 非相対論的な暗黒物質対 $q^\mu \sim (m_{\text{DM}}, \mathbf{0})$
- **Anti-collinear/Collinear** な終状態 : 光子と電弱ボソン $p^\mu \sim m_{\text{DM}} n^\mu, \ell^\mu \sim m_{\text{DM}} \bar{n}^\mu$
- **Soft** な放射 : 電弱ボソンの放射 Λ_s^2

Amplitude: $\propto \# \log \left(\frac{Q^2, P^2, L^2, \Lambda_s^2}{\mu^2} \right) + \# \left[\log \left(\frac{Q^2, P^2, L^2, \Lambda_s^2}{\mu^2} \right) \right]^2 + \dots$

くりこみ群に効いてくる

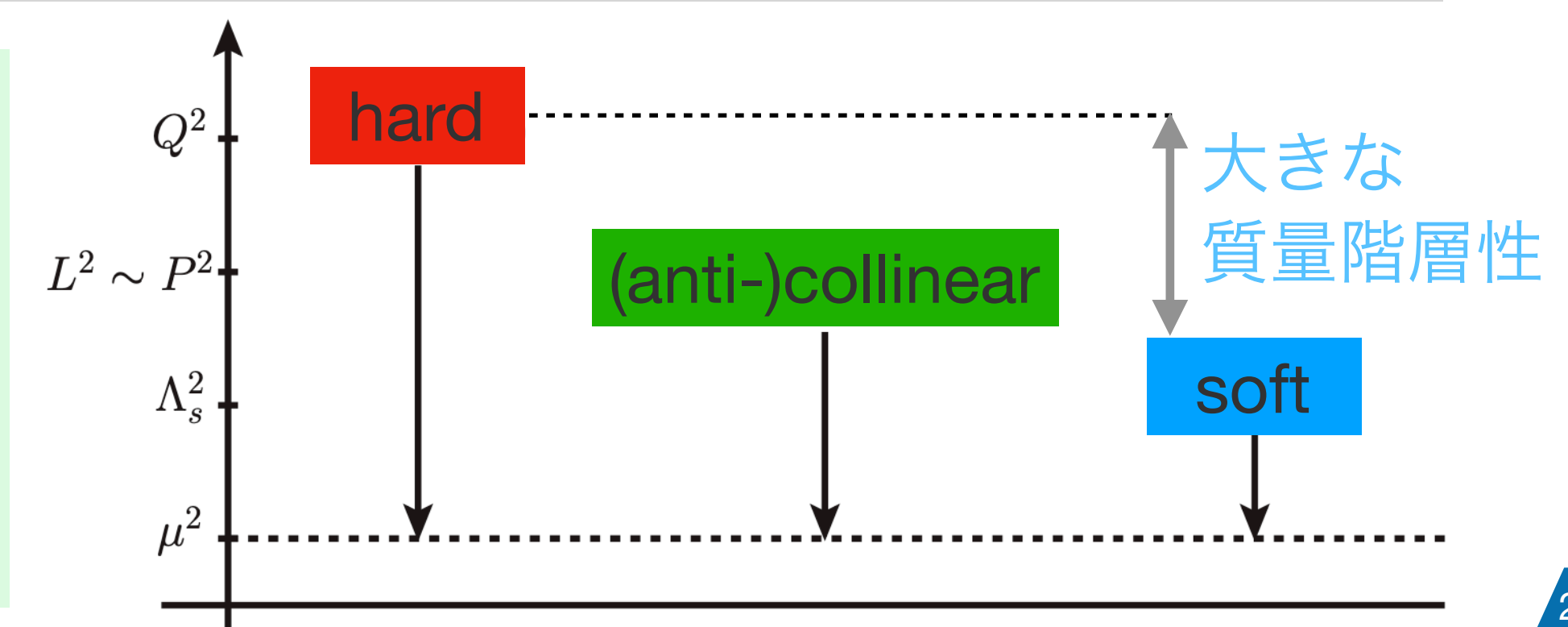
cf. Sudakov form factor in QED
[Peskin-Schroeder's textbook, Ch. 6]

問題の本質: 振幅が様々なエネルギースケールに依存 ($Q^2, P^2, L^2, \Lambda_s^2$)

e.g. くりこみスケールを $\mu = \Lambda_s$ とした場合 $\log(Q^2/\mu^2) \gg 1$

→ 大きい log 補正を体系的に抑制することができない

→ 摂動計算が破綻、くりこみスケール依存性から大きな不定性が生じる



解決方法: Factorization(因数分解)

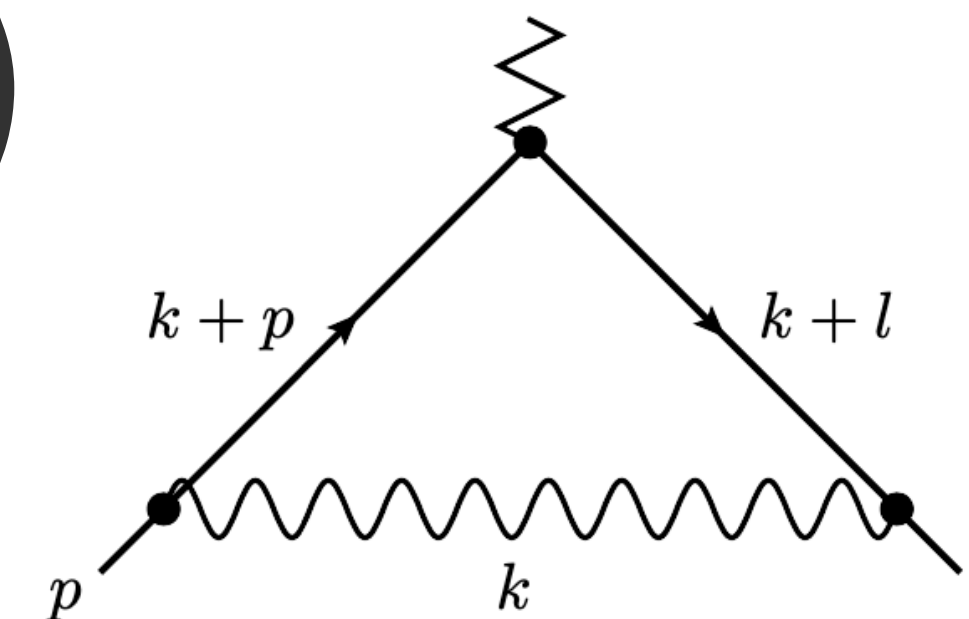
$$i\mathcal{M} = (\text{complicated func. of } \{Q^2, P^2, L^2, \Lambda_s^2\})$$

Method of region + 次元正則化

→ loop 運動量のスケールを分類できる

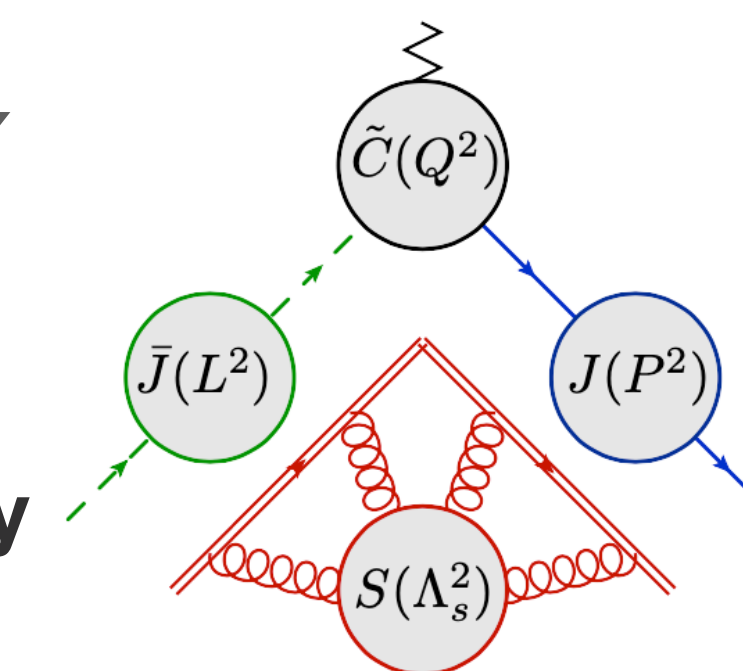
$$= \underbrace{C(Q^2, \mu)}_{\text{hard}} \times \underbrace{J(P^2, \mu)}_{\text{anti-collinear}} \times \underbrace{\bar{J}(L^2, \mu)}_{\text{collinear}} \times \underbrace{S(\Lambda_s^2, \mu)}_{\text{soft}}$$

元の理論



マッチング

Soft Collinear Effective Theory



理論的戦略

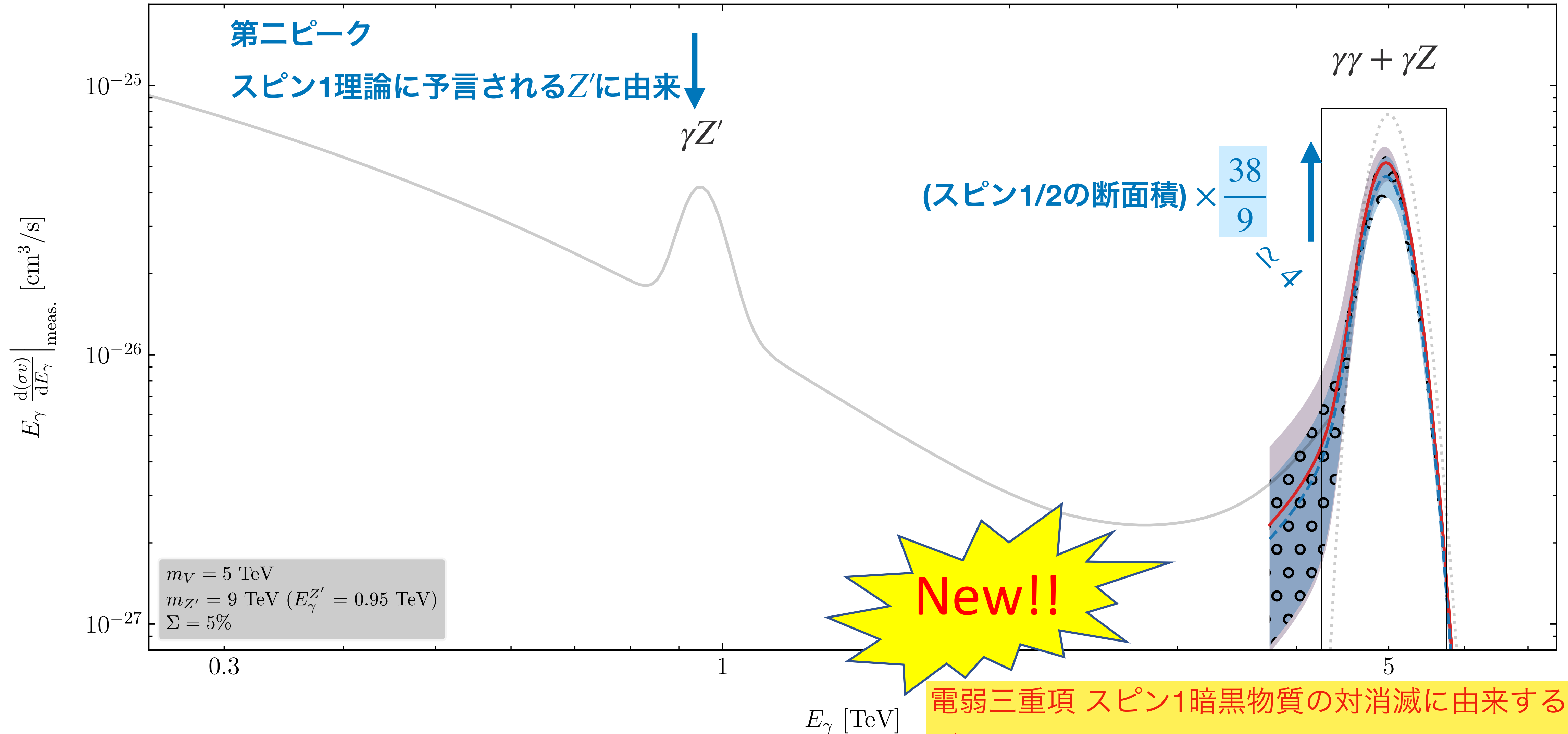
特定の運動学的状況のもとで、元の理論の対消滅振幅を再現するような有効理論を構築する

- 有効理論においては、各エネルギースケール (hard, collinear, anti-collinear, soft) が自動的に因数分解される

$$(\text{Multi-energy system}) \Leftarrow \text{マッチング} \Rightarrow (\text{single-energy system}) \times 4$$

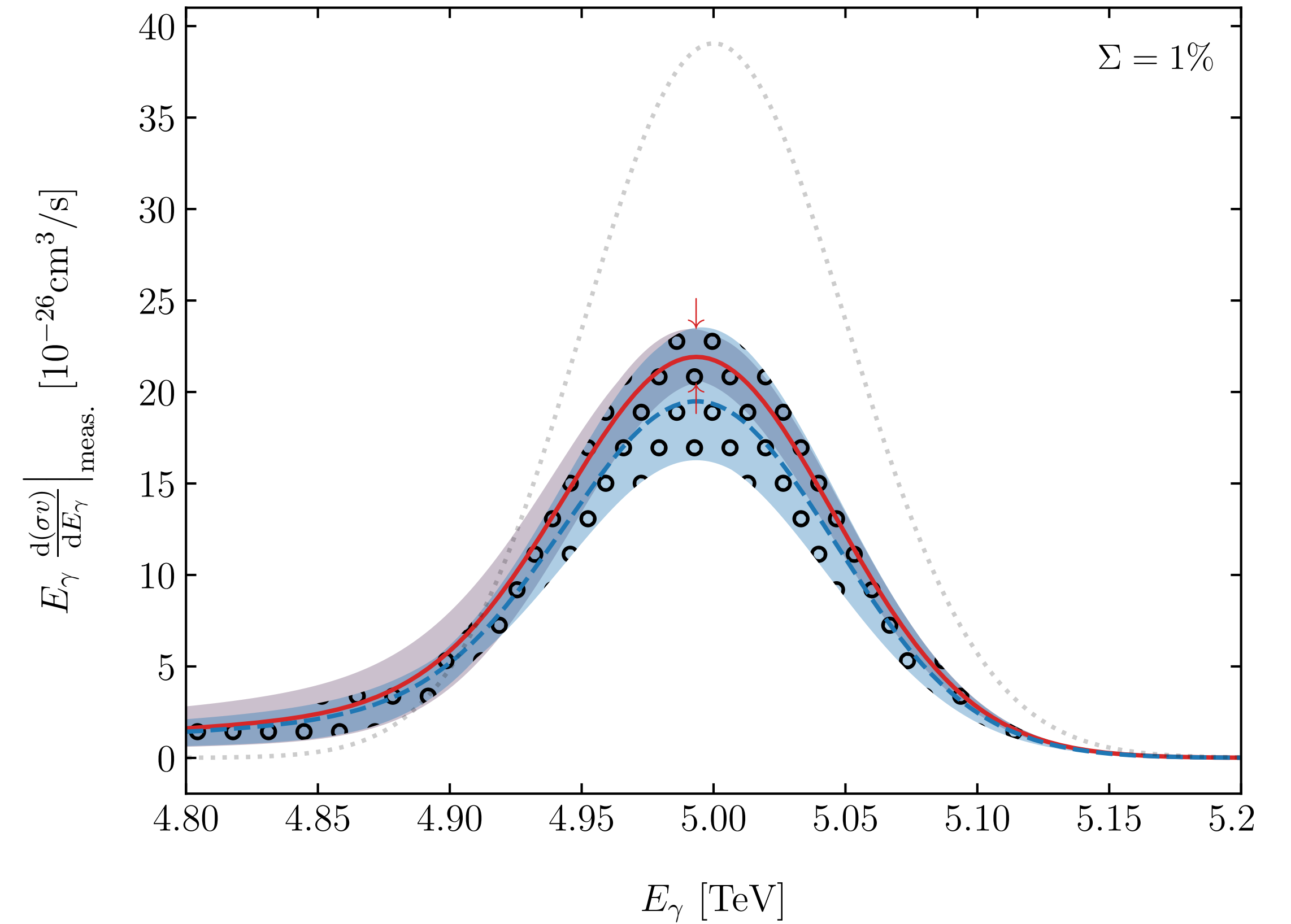
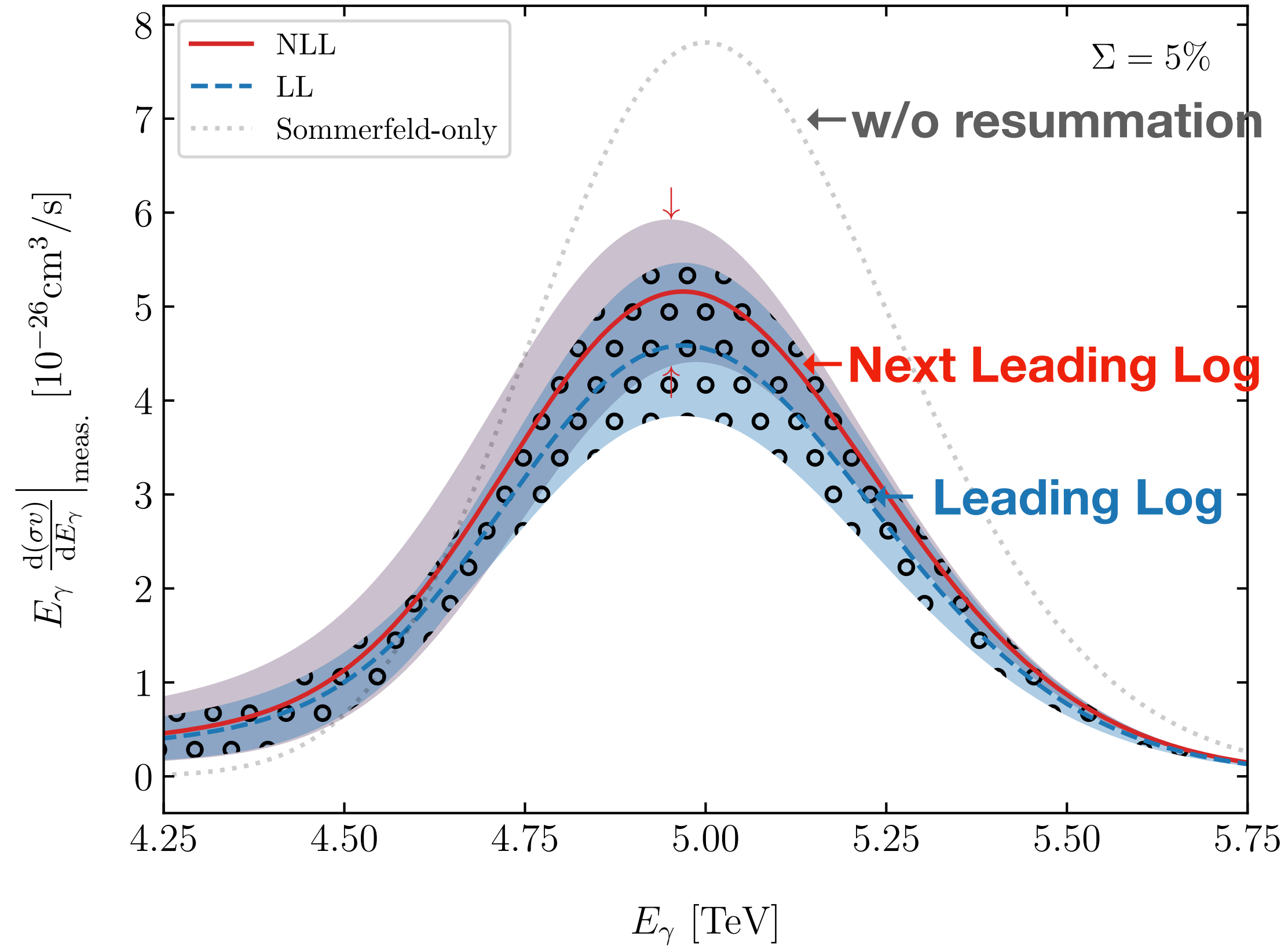
結果 (1/2)

スピン依存あり: (1) ピークの位置
(2) 弾面積の大きさ
スピン依存なし: ピークの形状 (@Next Leading Log)



電弱三重項 スピン1暗黒物質の対消滅に由来する
ガンマ線スペクトル

結果 (2/2)



log 補正の体系的な足し上げによって、不定性を体系的に減らすことに成功

精密なガンマ線スペクトルを導出する理論的フレームワークが全ての電弱三重項に関して完成した

まとめ

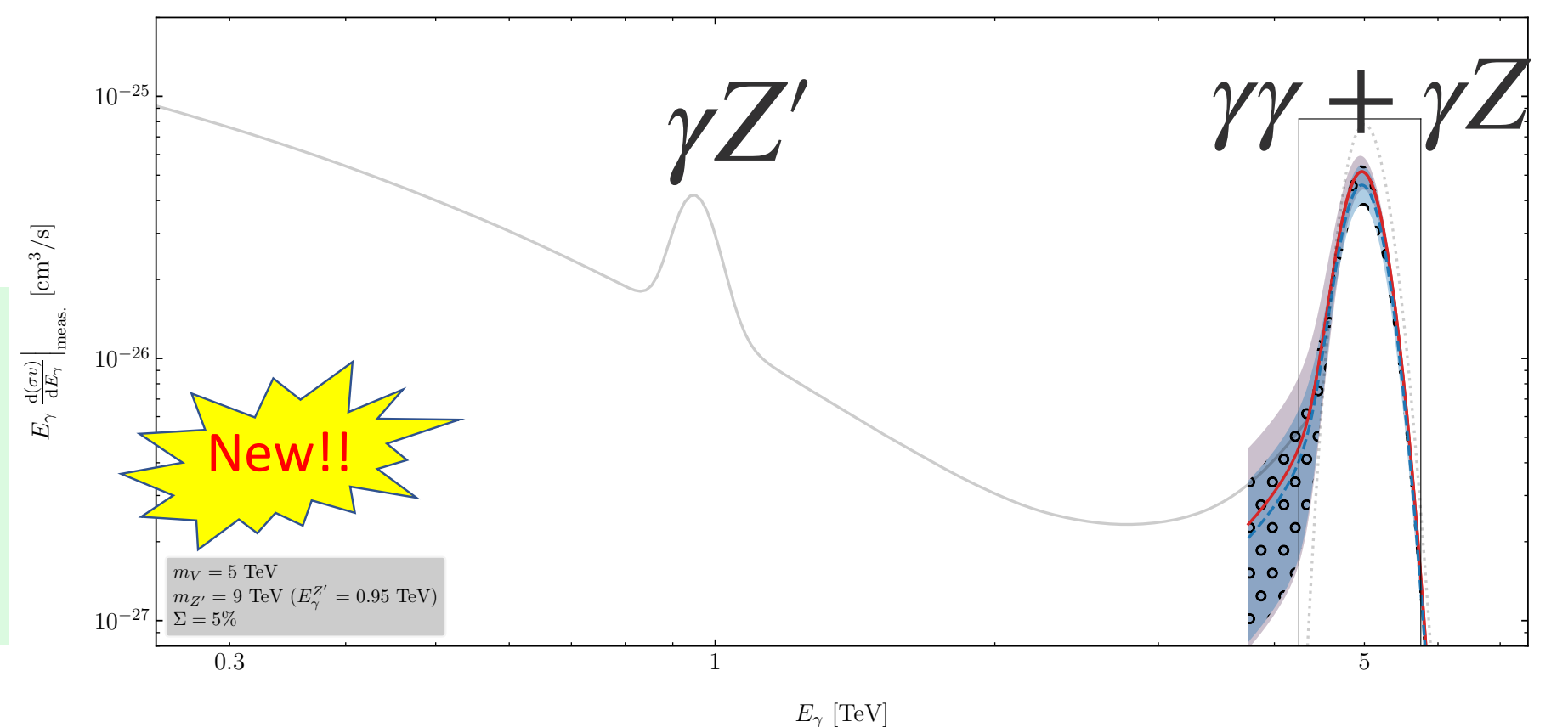
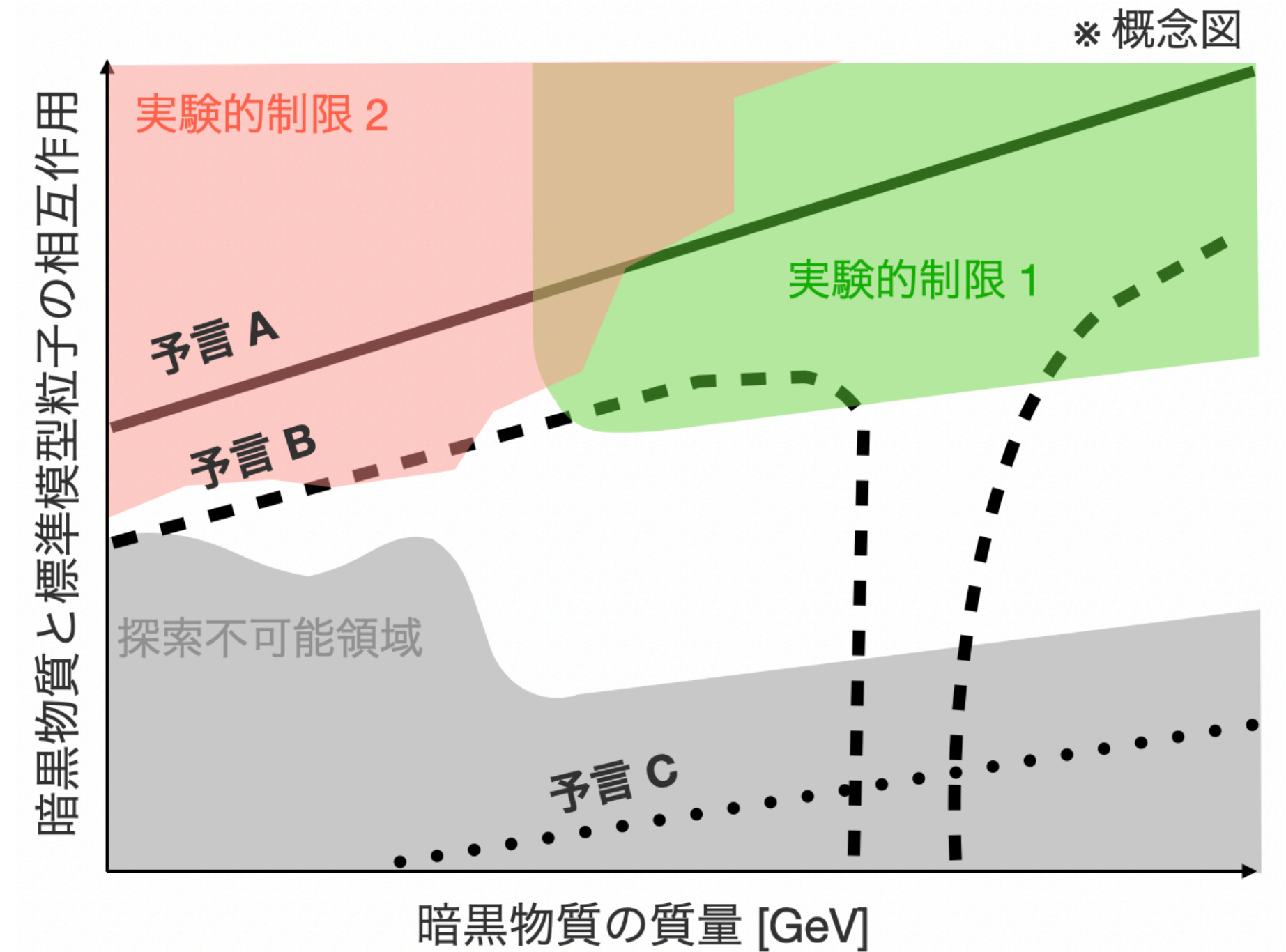
暗黒物質

- 宇宙に存在する未知の重力源の総称、未知の素粒子かもしれない
- WIMPシナリオ: よく用いられる素粒子論的な暗黒物質の理論的枠組み
- 理論・実験の双方向から仮説を検証していくことが重要
 - 新しいシナリオの提唱・理論予言の精密化・新しい探索手段の開発

電弱暗黒物質 理論予言の精密化

- 電弱三重項の暗黒物質の枠組みでガンマ線スペクトルを精密化
- Soft Collinear Effective Theory → log補正の体系的な足し上げ
- スピン1候補に関して初めて有効理論を構築・精密なスペクトルを導出

電弱三重項暗黒物質について全てのスピンについて精密化の枠組みを確立
→ 将来ガンマ線観測でスピンを識別するための礎となる研究



今後の展望

- 全ての質領域に適用できる有効理論の構築 → 暗黒物質の包括的なパラメータ域に関して精密な予言を確立したい
- 暗黒物質の生成量の予言の確立(ongoing) → 暗黒物質理論として探索すべきパラメータ域はどこなのか特定したい
- BGからダブルピークを分離する方法開発 → 将来実験(CTA)における探索可能性を定量的に正しく明らかにしたい

