

物質の起源と 初期宇宙の進化を 解き明かす理論研究

佐藤 亮介



2024. 7. 6 @ 極稀事象で探る宇宙物質の起源と進化 キックオフミーティング

[1]

E01班のメンバー

(代表) 佐藤亮介



大阪大学

統括・アクション

(分担) 濱口幸一



東京大学

反物質消失の理論

(分担) 松本重貴



東京大学IPMU

暗黒物質理論

(分担) 長尾桂子



岡山理科大学

暗黒物質理論

(分担) 柳田勉



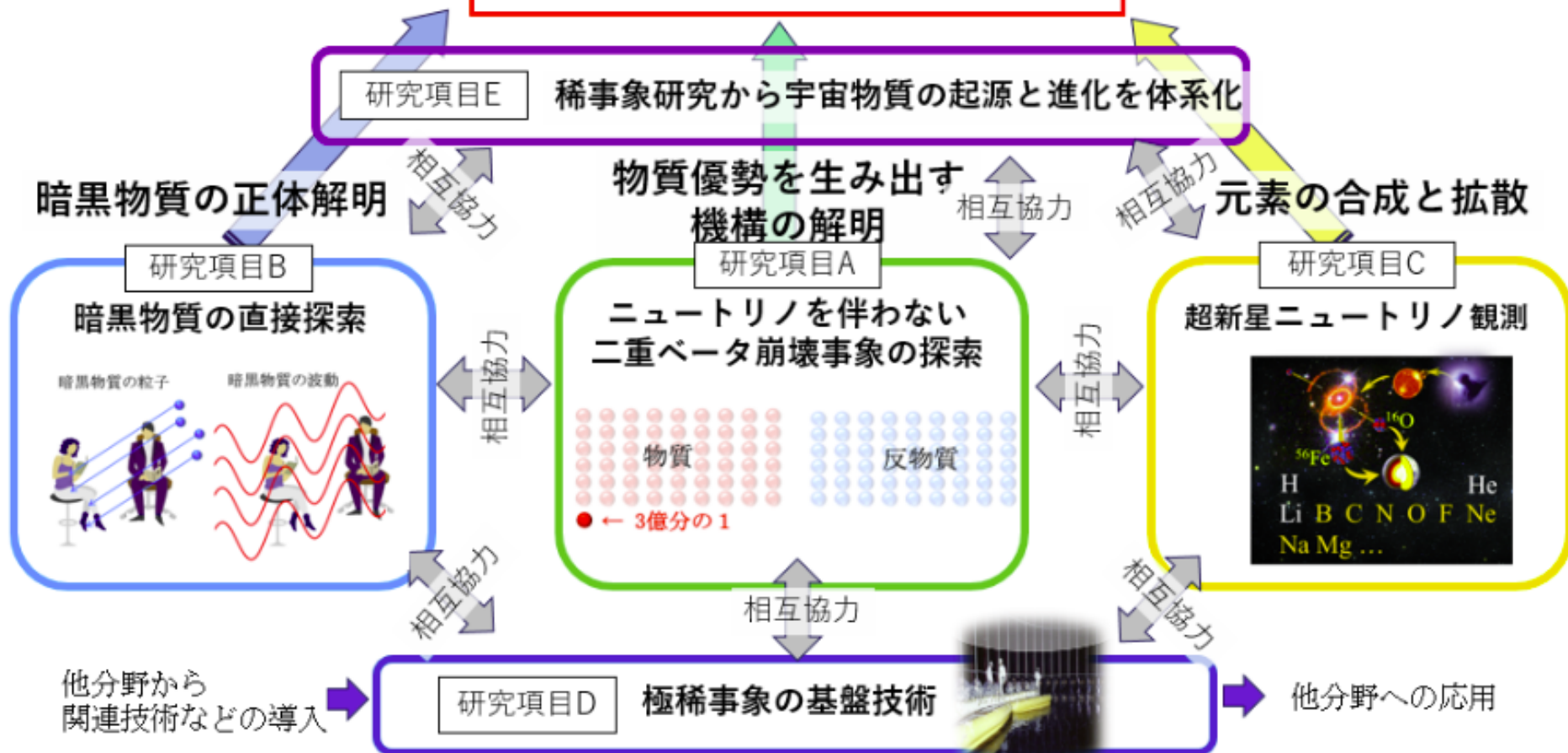
東京大学IPMU

素粒子模型構築

理論班の役割 (E01班、E02班)

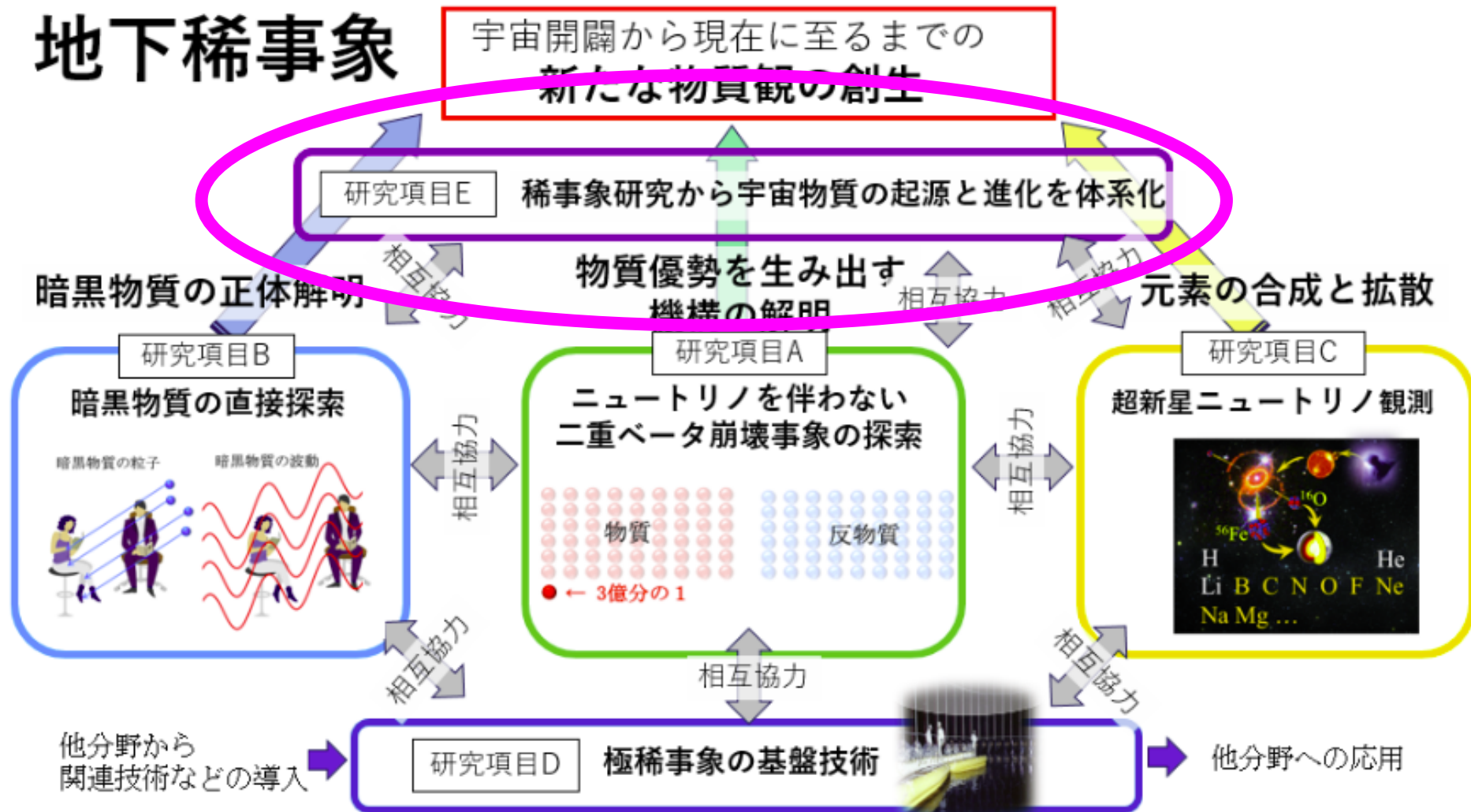
地下稀事象

宇宙開闢から現在に至るまでの 新たな物質観の創生

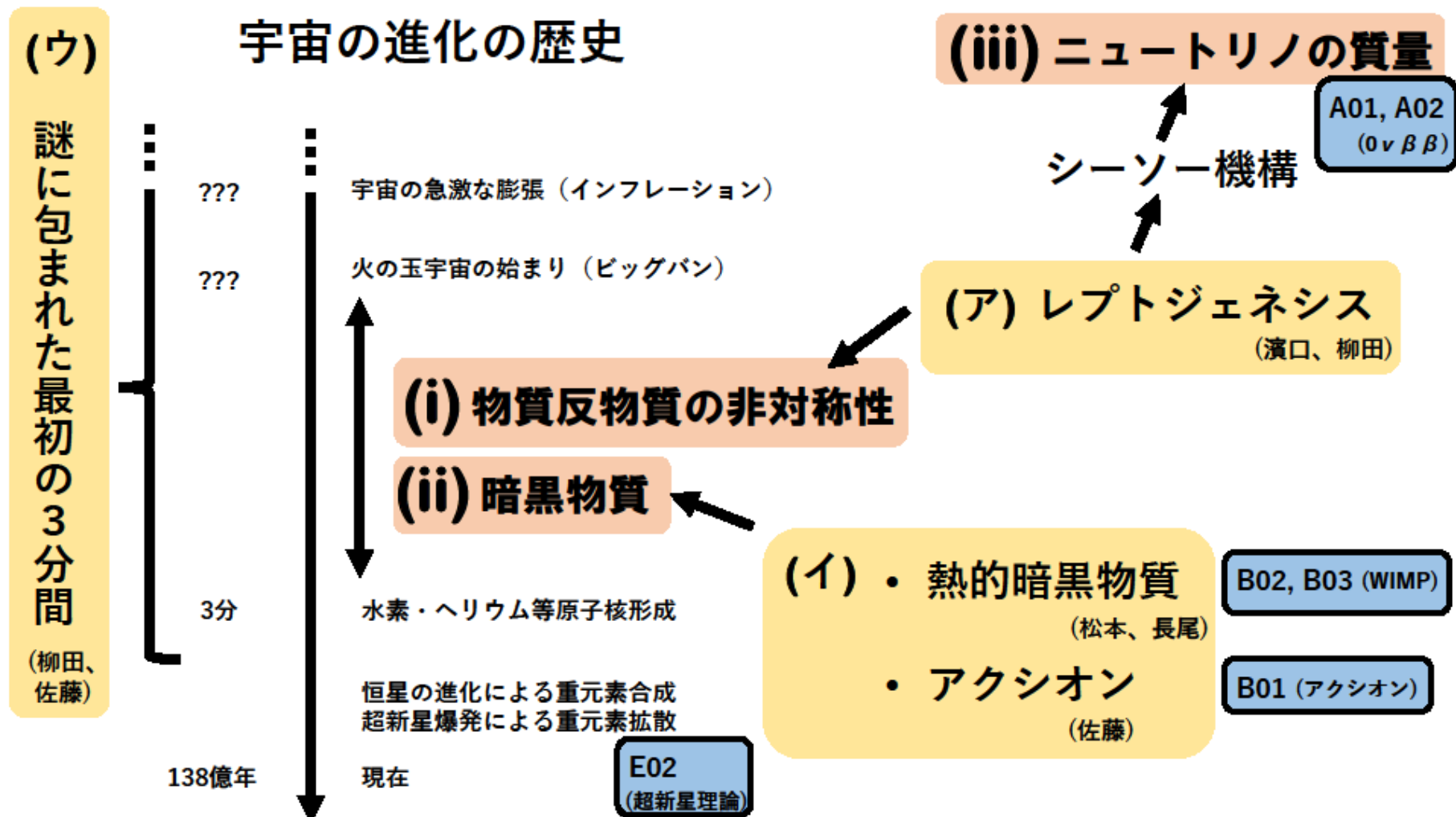


理論班の役割（E01班、E02班）

地下稀事象

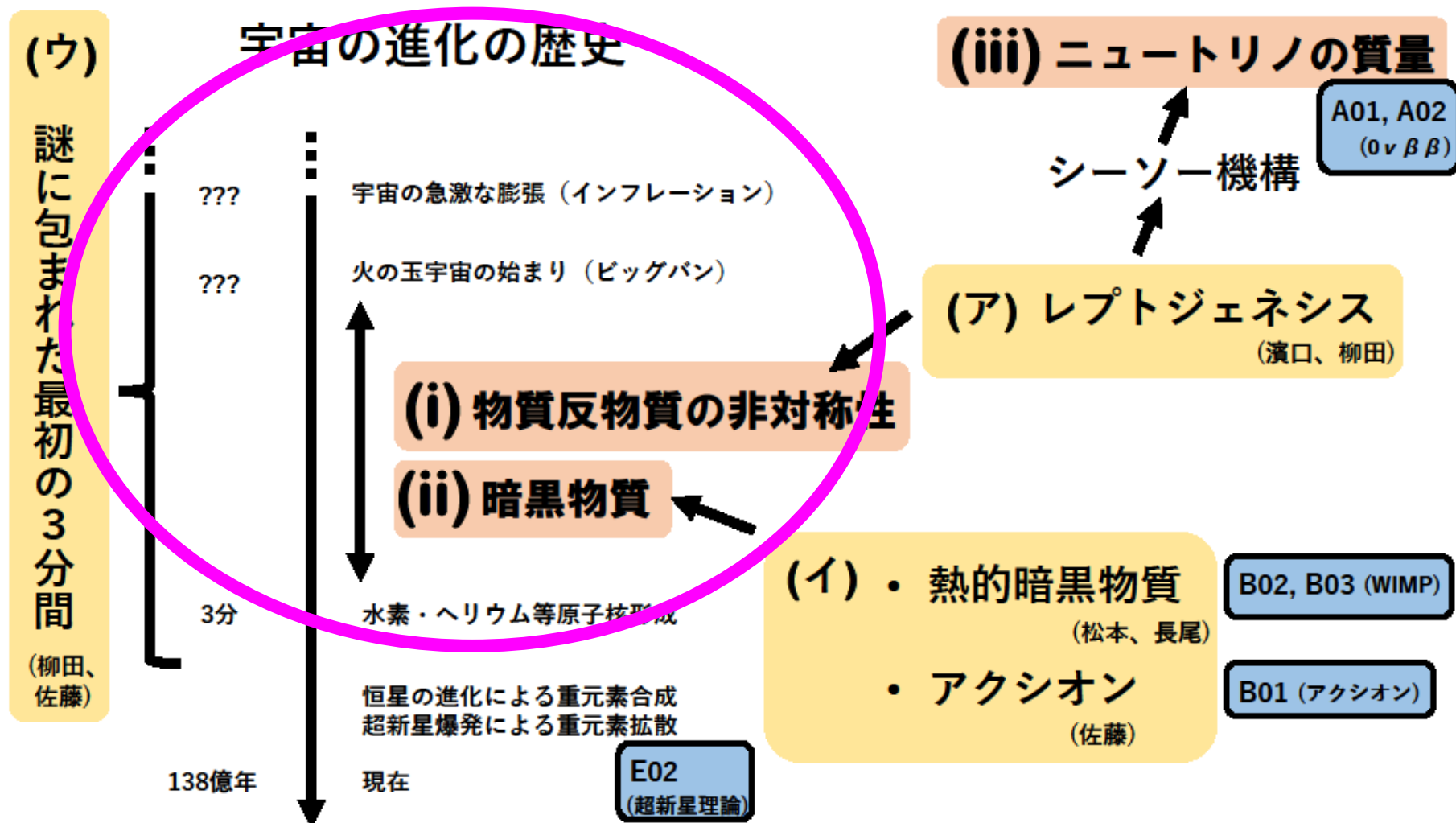


E01班の役割



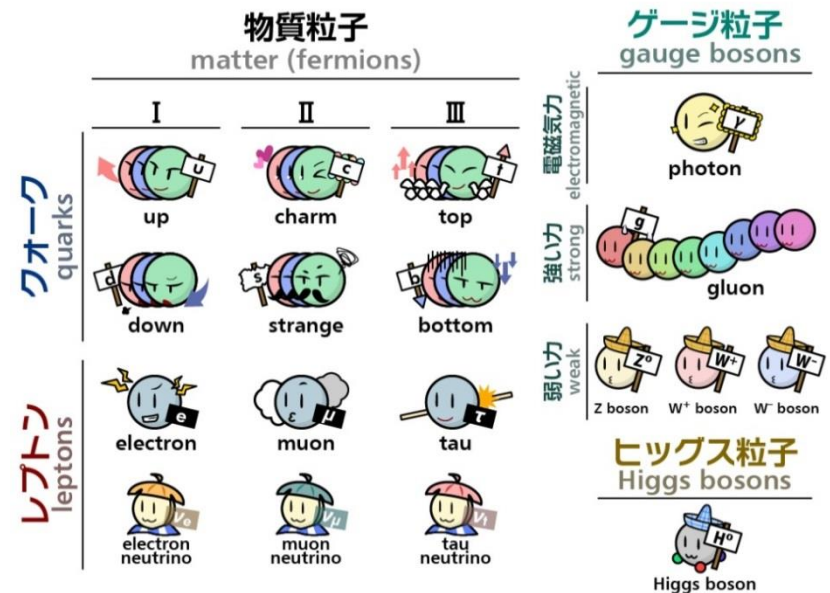
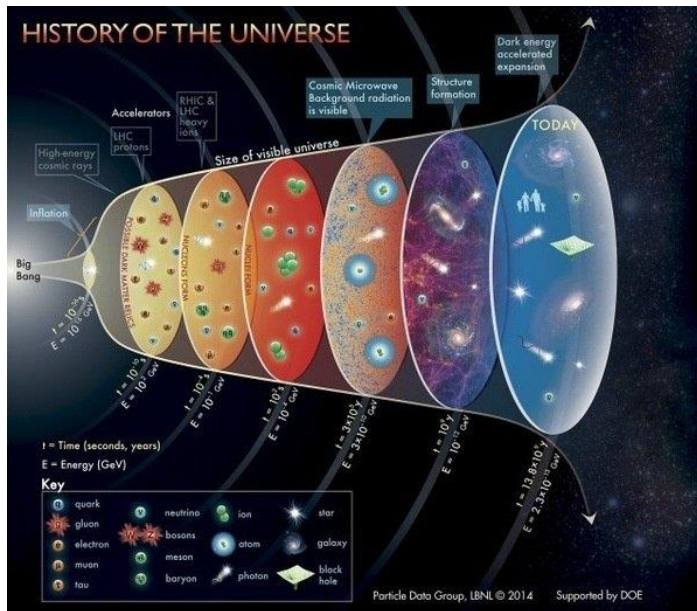
E01班の役割

宇宙の歴史の初期の問題にアタックする



初期宇宙と素粒子

高温の初期宇宙（ビッグバン宇宙論） → すべてが素粒子レベルでバラバラ
宇宙の始まりを知るには素粒子が大事



標準模型では解けない重要な問題 → **標準模型を超える物理**が必要！

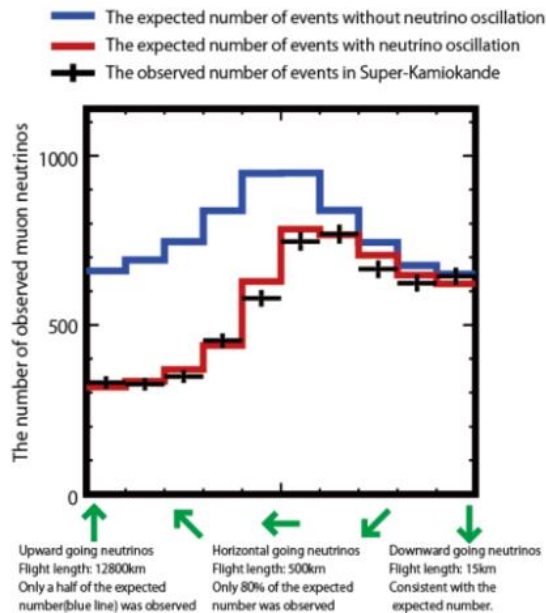
Beyond the Standard Model

素粒子物理と初期宇宙の大きな謎

1. ニュートリノの質量の起源は何か？
2. 暗黒物質の正体は何か？なぜこの宇宙に存在するのか？
3. 物質と反物質の非対称性はどのようにして生まれたのか？

素粒子物理と初期宇宙の大きな謎

1. ニュートリノの質量の起源は何か？
2. 暗黒物質の正体は何か？なぜこの宇宙に存在するのか？
3. 物質と反物質の非対称性はどのようにして生まれたのか？



標準模型を越える物理の動かぬ証拠

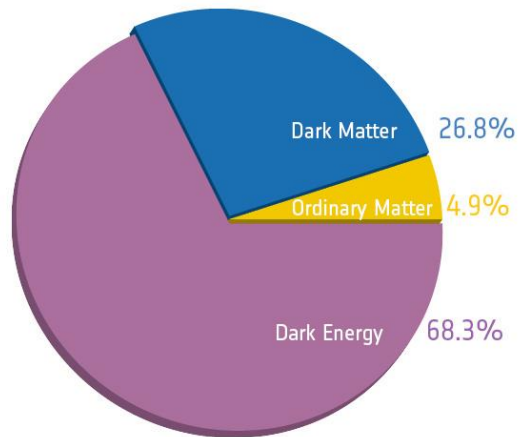
- ・ 標準模型ではニュートリノは質量0
- ・ 標準模型ではレプトンフレーバーの破れなし

つまり、BSMが必要！

[<https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/sk/neutrino/kajita/vibration/>]

素粒子物理と初期宇宙の大きな謎

1. ニュートリノの質量の起源は何か？
2. 暗黒物質の正体は何か？なぜこの宇宙に存在するのか？
3. 物質と反物質の非対称性はどのようにして生まれたのか？



[ESA/Planck]

標準模型には、暗黒物質の候補なし

つまり、BSMが必要！！

素粒子物理と初期宇宙の大きな謎

1. ニュートリノの質量の起源は何か？
2. 暗黒物質の正体は何か？なぜこの宇宙に存在するのか？
3. 物質と反物質の非対称性はどのようにして生まれたのか？

高温 ($T \simeq 100 \text{ GeV}$) の宇宙：

この差は標準模型では説明できない！！

バリオン	300,000,000	+ 1 現在の宇宙まで残った
反バリオン	300,000,000	

対消滅して消えた

つまり、BSMが必要！！！！

素粒子物理と初期宇宙の大きな謎

1. ニュートリノの質量の起源は何か？
2. 暗黒物質の正体は何か？なぜこの宇宙に存在するのか？
3. 物質と反物質の非対称性はどのようにして生まれたのか？

他にも解くべき問題いろいろ

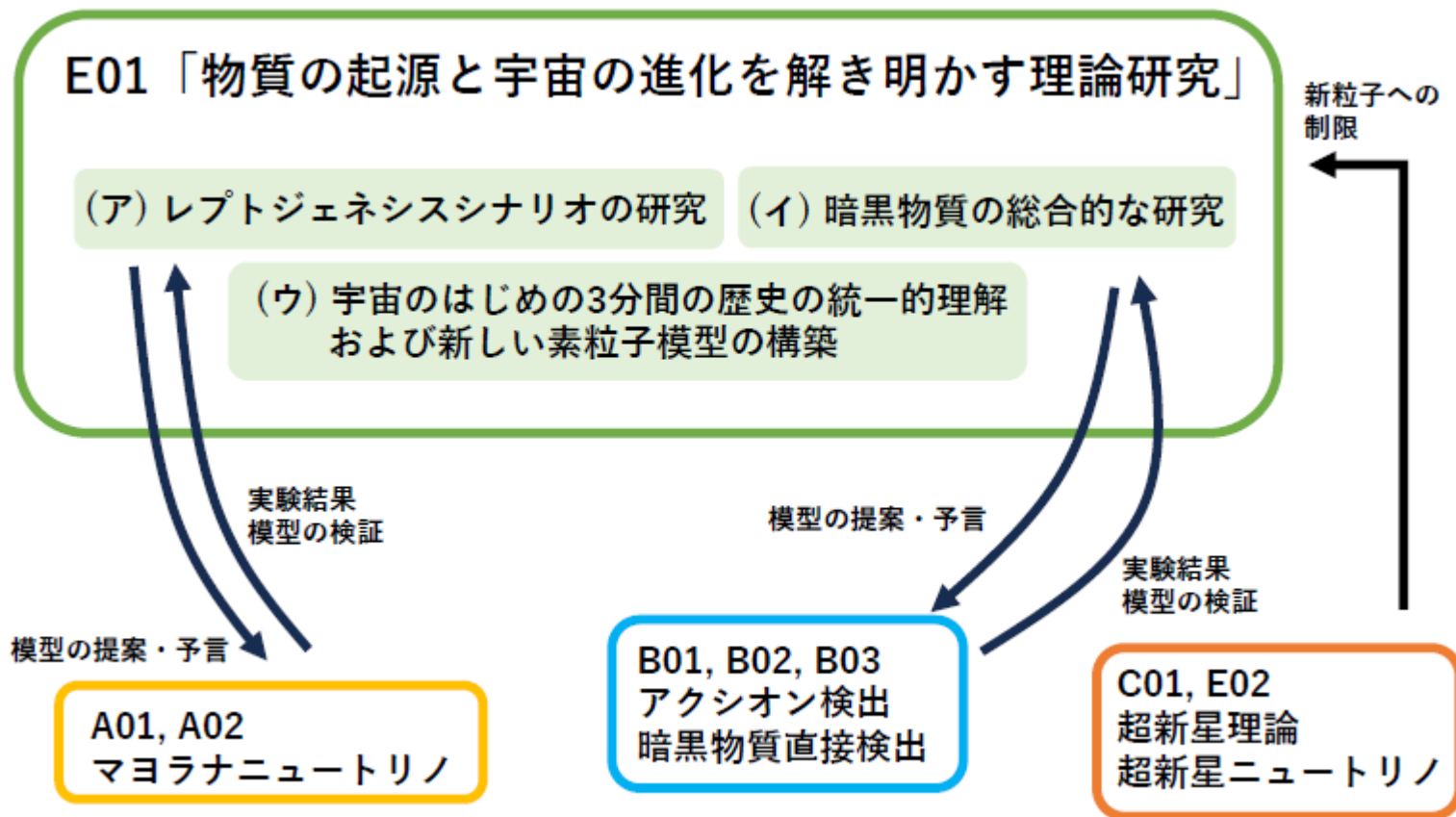
- 宇宙のインフレーションはどうやって起こったか？
- 大統一理論はあるのか？
- 超対称性粒子はあるのか？
- 強いCP問題？
- 階層性問題？
- ...

素粒子物理と初期宇宙の大きな謎

1. ニュートリノの質量の起源は何か？
2. 暗黒物質の正体は何か？なぜこの宇宙に存在するのか？
3. 物質と反物質の非対称性はどのようにして生まれたのか？

E01班のアプローチ

- (ア) レプトジェネシス → 1, 3
- (イ) WIMPやアクシオンにまたがる暗黒物質の総合的研究 → 2
- (ウ) (ア)および(イ)を含む、素粒子模型および初期宇宙史の研究 → 1, 2, 3



E01 「物質の起源と宇宙の進化を解き明かす理論研究」

(ア) レプトジェネシスシナリオの研究

(イ) 暗黒物質の総合的な研究

(ウ) 宇宙のはじめの3分間の歴史の統一的理解
および新しい素粒子模型の構築

新粒子への
制限

実験結果
模型の検証

模型の提案・予言

実験結果
模型の検証

模型の提案・予言

A01, A02

マヨラナニュートリノ

B01, B02, B03
アクシオン検出
暗黒物質直接検出

C01, E02
超新星理論
超新星ニュートリノ

レプトジェネシス

重い右巻きニュートリノ (ν_R)

シーソー機構 → ニュートリノ質量

マヨラナ質量 → レプトン数の非保存

- 物質反物質非対称性の生成

Volume 174, number 1

PHYSICS LETTERS B

26 June 1986

BARYOGENESIS WITHOUT GRAND UNIFICATION

M FUKUGITA

Research Institute for Fundamental Physics, Kyoto University, Kyoto 606, Japan

and

T YANAGIDA

*Institute of Physics, College of General Education, Tohoku University, Sendai 980, Japan
and Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, D-2000 Hamburg, Fed. Rep. Germany*

Received 8 March 1986

A mechanism is pointed out to generate cosmological baryon number excess without resorting to grand unified theories. The lepton number excess originating from Majorana mass terms may transform into the baryon number excess through the unsuppressed baryon number violation of electroweak processes at high temperatures.

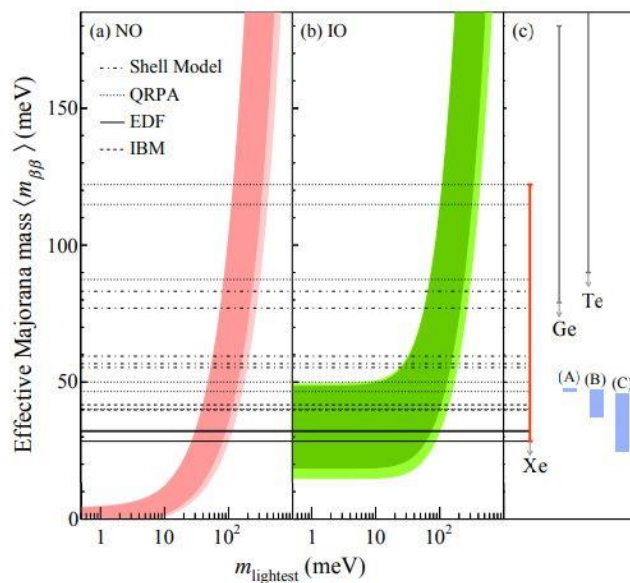
レプトジェネシス

重い右巻きニュートリノ (ν_R)

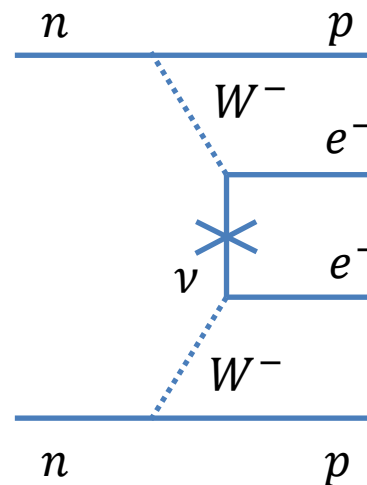
シーソー機構 → ニュートリノ質量

マヨラナ質量 → レプトン数の非保存

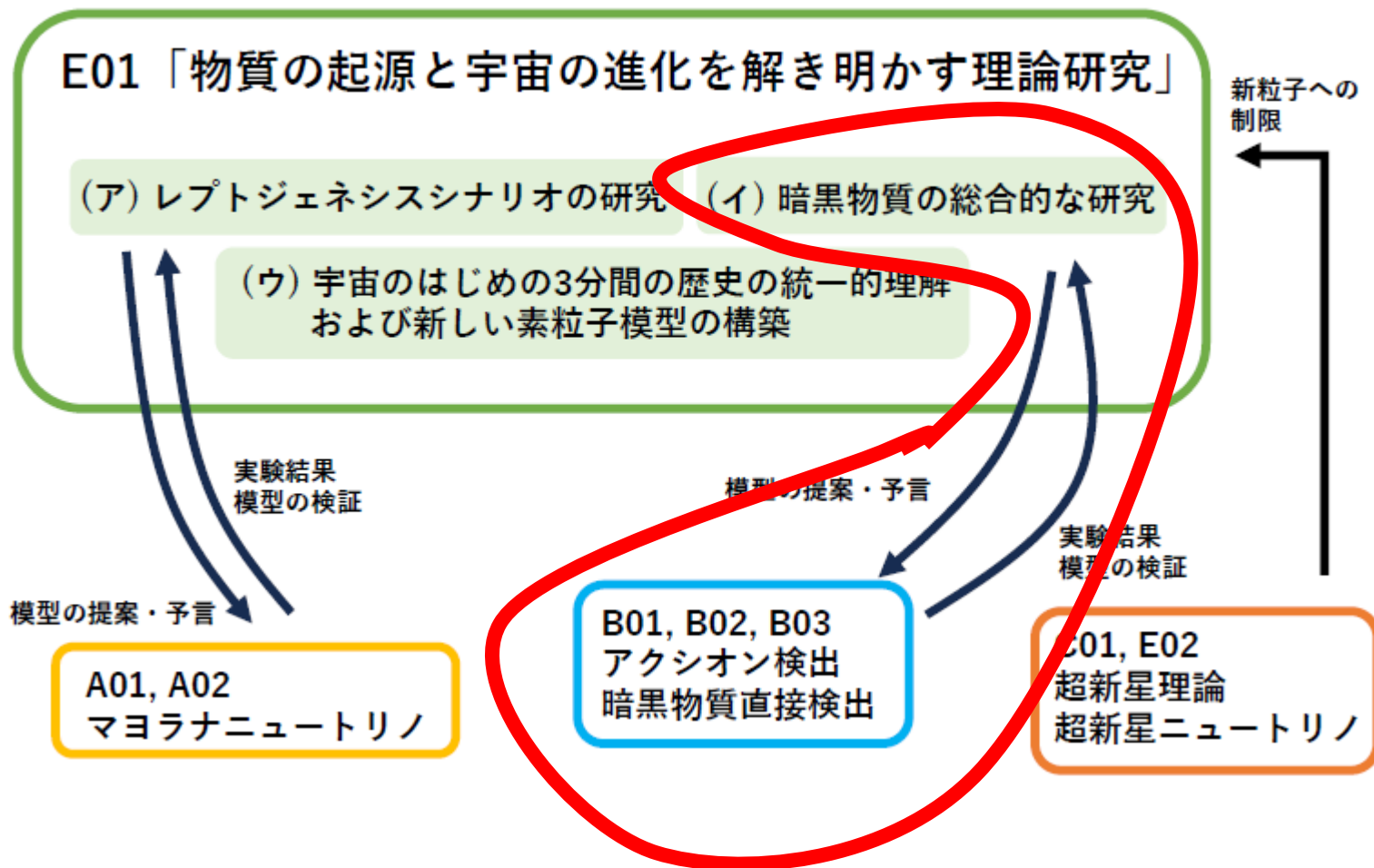
- 物質反物質非対称性の生成
- $0\nu\beta\beta$ 崩壊



[KamLAND-Zen, arXiv:2406.11438]



$\langle m_{\beta\beta} \rangle$ の情報を足がかりに、右巻きニュートリノの情報にアクセス



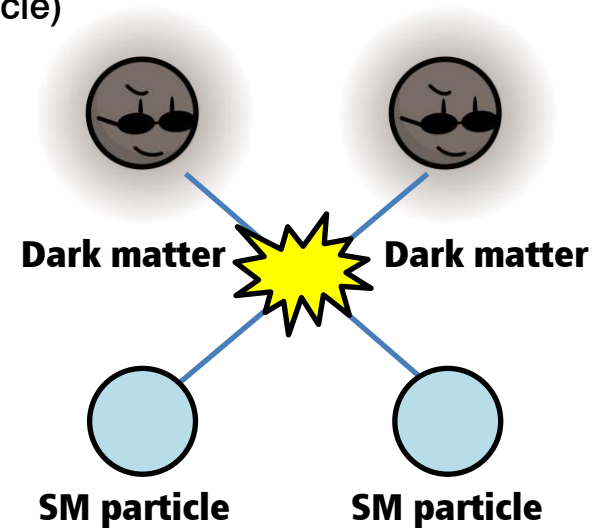
暗黒物質は何か

熱的暗黒物質 WIMP (Weakly Interacting Massive Particle)

- 直接探索実験
- 間接探索実験
- 加速器実験

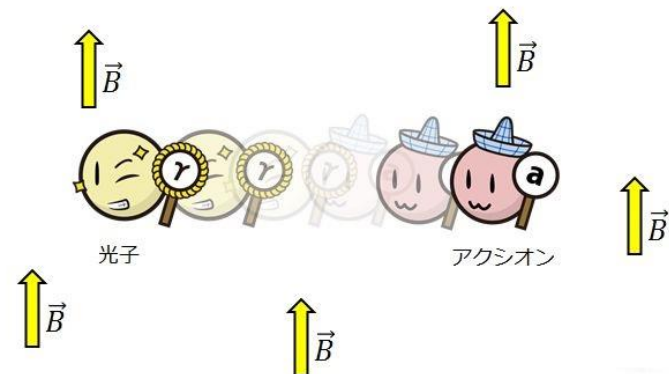
で多角的に探る

- 暗黒物質模型構築
- 有効理論を用いた解析



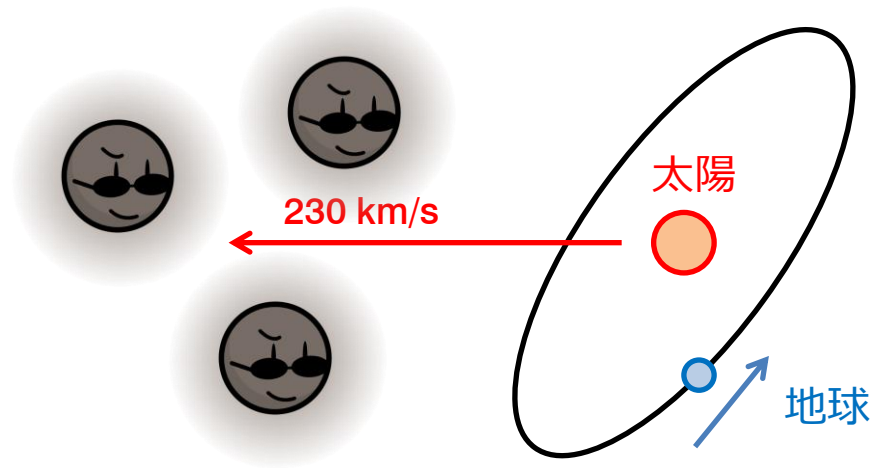
非熱的暗黒物質 アクシオンなど

- アクシオン探索実験
- アクシオン暗黒物質生成シナリオ
- Axion quality problem



暗黒物質はどのように存在するか

太陽系は、銀河系を230km/sで走る。



“暗黒物質の風”を受けるはず。
そもそも太陽系近傍の暗黒物質密度、速度分布は？

次の長尾さんのトーク！

E01 「物質の起源と宇宙の進化を解き明かす理論研究」

(ア) レプトジェネシスシナリオの研究

(イ) 暗黒物質の総合的な研究

(ウ) 宇宙のはじめの3分間の歴史の統一的理解
および新しい素粒子モデルの構築

実験結果
モデルの検証

モデルの提案・予言

実験結果
モデルの検証

モデルの提案・予言

A01, A02
マヨラナニュートリノ

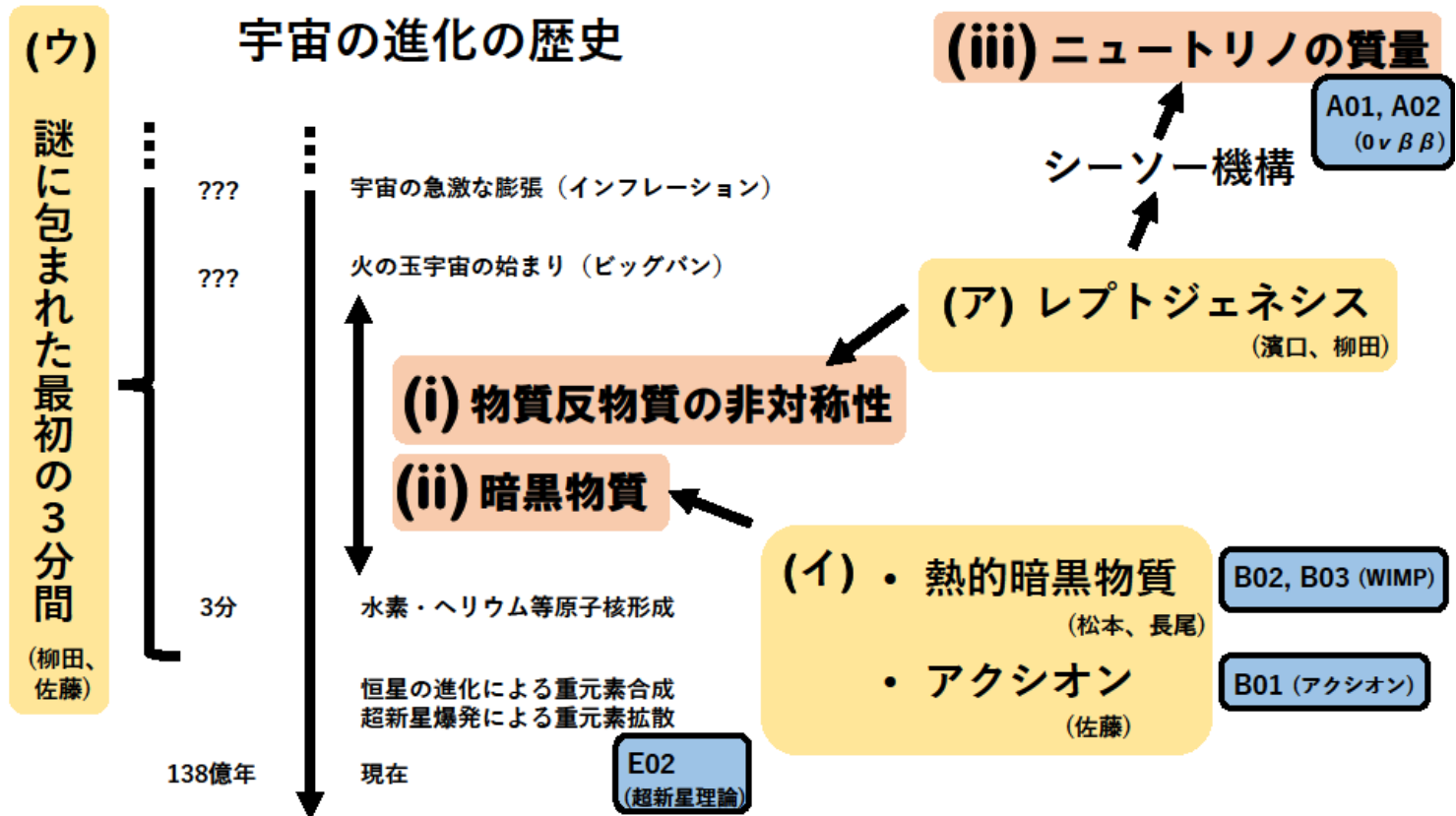
B01, B02, B03
アクシオン検出
暗黒物質直接検出

C01, E02
超新星理論
超新星ニュートリノ

新粒子への
制限

初期宇宙史

インフレーション終了後、暗黒物質生成、物質反物質生成を含む
矛盾の無い初期宇宙史および**素粒子模型**が必要！



アクシオン暗黒物質シナリオ

Misalignment mechanism

[Preskill, Wise, Wilczek (1983)]

[Abbott, Sikivie (1983)]

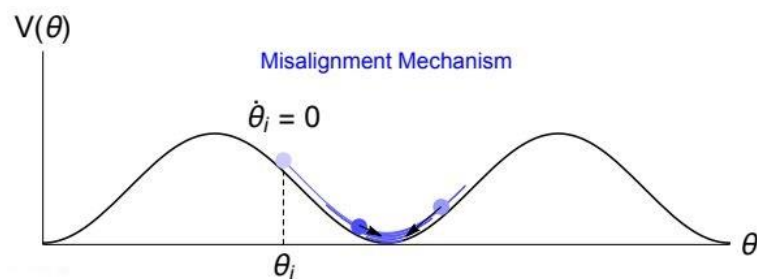
[Dine, Fischler (1983)]

初期条件

$$\phi = \phi_0 \neq 0$$
$$\dot{\phi} = 0$$

運動方程式

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\Lambda_b^4(T)}{f} \sin \frac{\phi}{f} = 0$$



[taken from Co, Hall, Harigaya (2019)]

アクシオン場が転がり始める条件： $3H(T) \sim m(T)$



$$\rho_{DM} \sim m_\phi \times \left(\frac{a(T_{osc})}{a_0} \right)^3 \times \frac{\Lambda_b(T_{osc})^4 \theta_i^2}{m_\phi(T_{osc})}$$

mass

Dilution factor

Number density at $T = T_{osc}$

$$\text{w/ } m_\phi(T_{osc}) \sim 3H(T_{osc})$$

アクシオン暗黒物質シナリオ

Kinetic Misalignment mechanism

[Co, Hall, Harigaya (2019)]

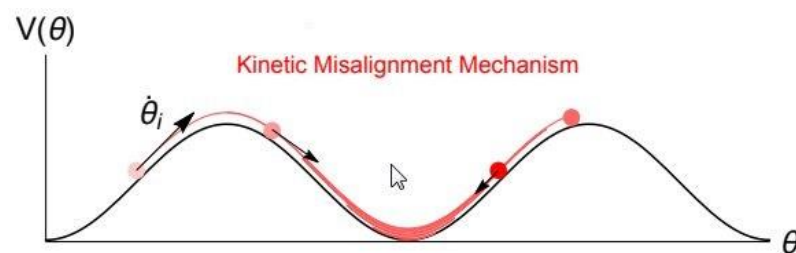
[Chang, Cui (2019)]

初期条件

$$\dot{\phi} > \Lambda_b^2$$

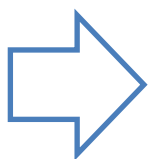
運動方程式

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\Lambda_b^4(T)}{f} \sin \frac{\phi}{f} = 0$$



[taken from Co, Hall, Harigaya (2019)]

アクシオン場が谷にトラップされ始める条件： $\dot{\phi}^2(T) \sim \Lambda_b^4(T)$



$$\rho_{DM} \sim m_\phi \times \left(\frac{a(T_{osc})}{a_0} \right)^3 \times \frac{\Lambda_b(T_{osc})^4}{m_\phi(T_{osc})}$$

mass

Dilution factor

Number density at $T = T_{osc}$

$$\text{w/ } \dot{\phi}^2(T_{osc}) \sim \Lambda_b^4(T_{osc})$$

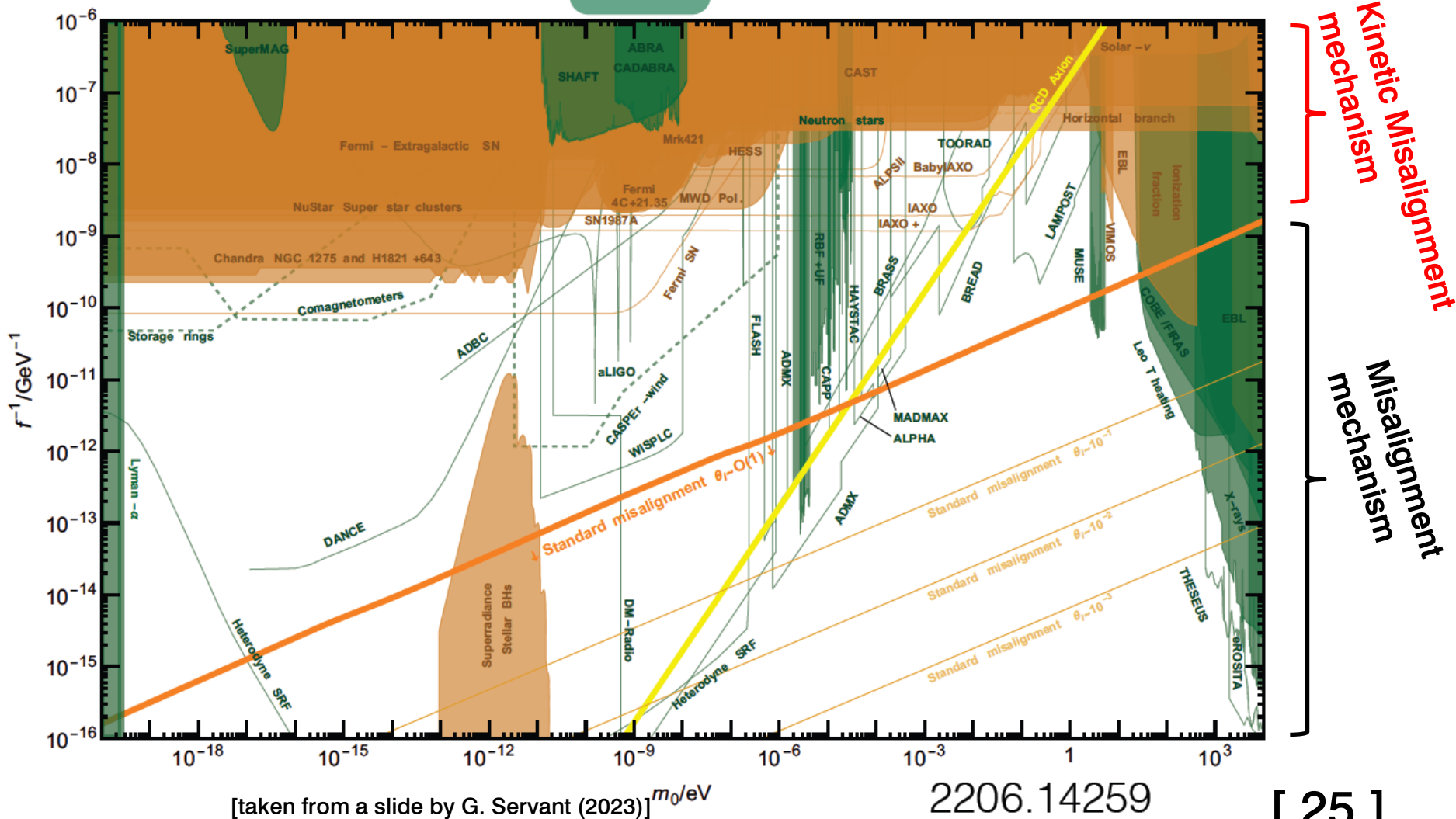
振動開始の遅れ → 大きめの ρ_{DM}

アクシオン探索

Any ALP

Only DM

(assuming KSVZ-like relation : $g_{a\gamma\gamma} \sim 2 \times 10^{-3}/f$)



2206.14259

[25]

アクシオンを転がす機構

Affleck-Dine mechanism

[Affleck, Dine (1985)]

[Dine, Randall, Thomas (1996)]

$$P = \frac{1}{\sqrt{2}} s \exp\left(\frac{i\phi}{f}\right)$$

P : PQ charged scalar

s : saxion

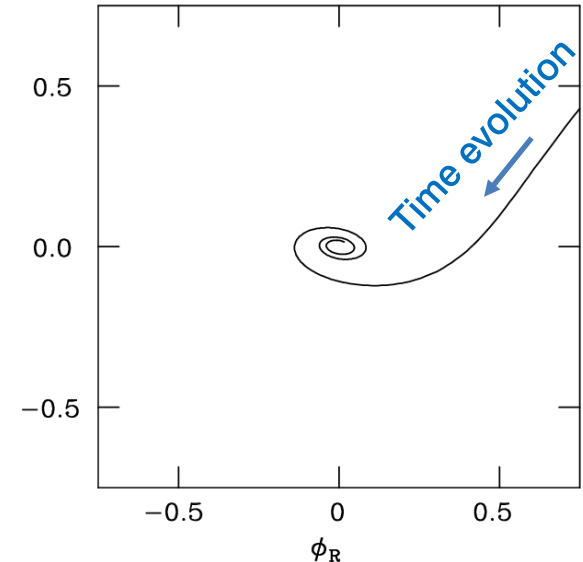
ϕ : axion

$$V(P) = V_{PQ}(|P|) + V_{PQ}(P)$$

PQ invariant term

PQ violating term

$$\text{e.g., } V_{PQ} \sim \frac{P^n}{\Lambda^{n-4}} + h.c. \quad \phi_I$$



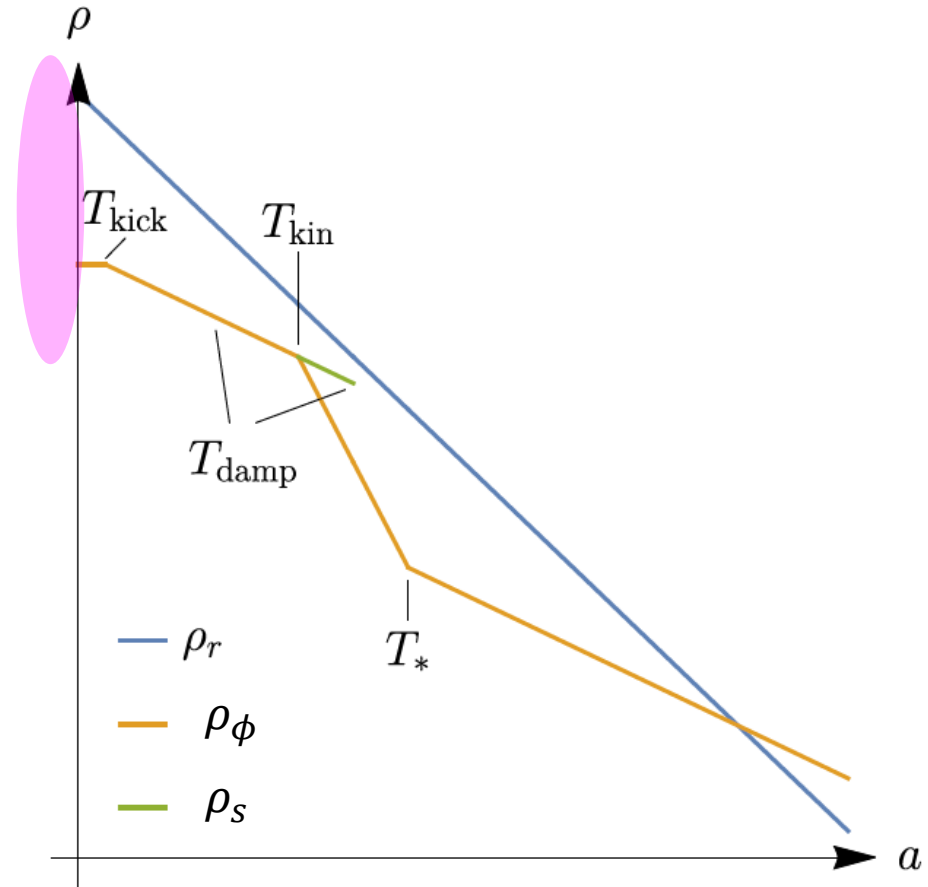
Taken from [Dine, Randall, Thomas (1996)]

A thermal history

Tachyonic mass drives Large VEV

$$\phi_{\text{early}} \sim (HM^{n-3})^{\frac{1}{n-2}}$$

$$V \simeq -c_H H^2 |P|^2 + \left(A \frac{P^n}{M^{n-3}} + h.c. \right) + \frac{|P|^{2n-2}}{M^{2n-6}}$$



[Eröncel, RS, Sørensen, Servant, in preparation]

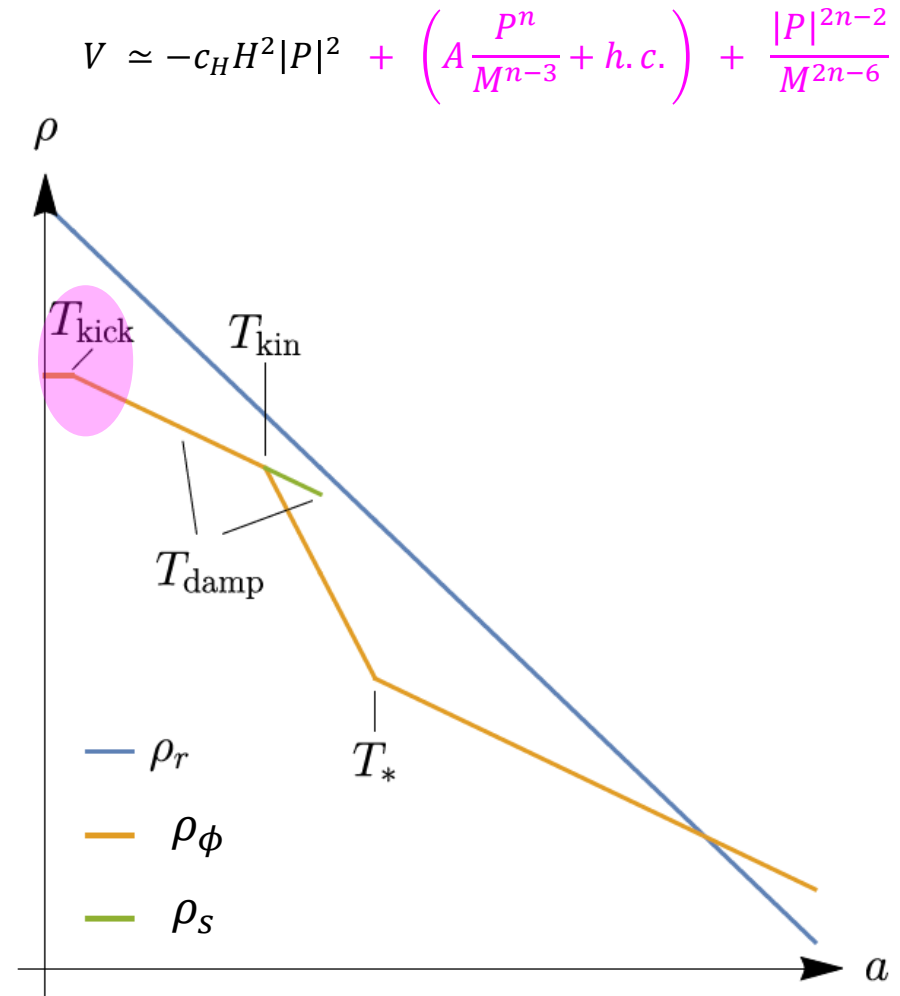
A thermal history

Tachyonic mass drives Large VEV

$$\phi_{\text{early}} \sim (HM^{n-3})^{\frac{1}{n-2}}$$

ϕ starts to roll

$$m \sim H, \quad T_{\text{kick}} \sim \sqrt{mM_{\text{pl}}}$$



[Eröncel, RS, Sørensen, Servant, in preparation]

A thermal history

Tachyonic mass drives Large VEV

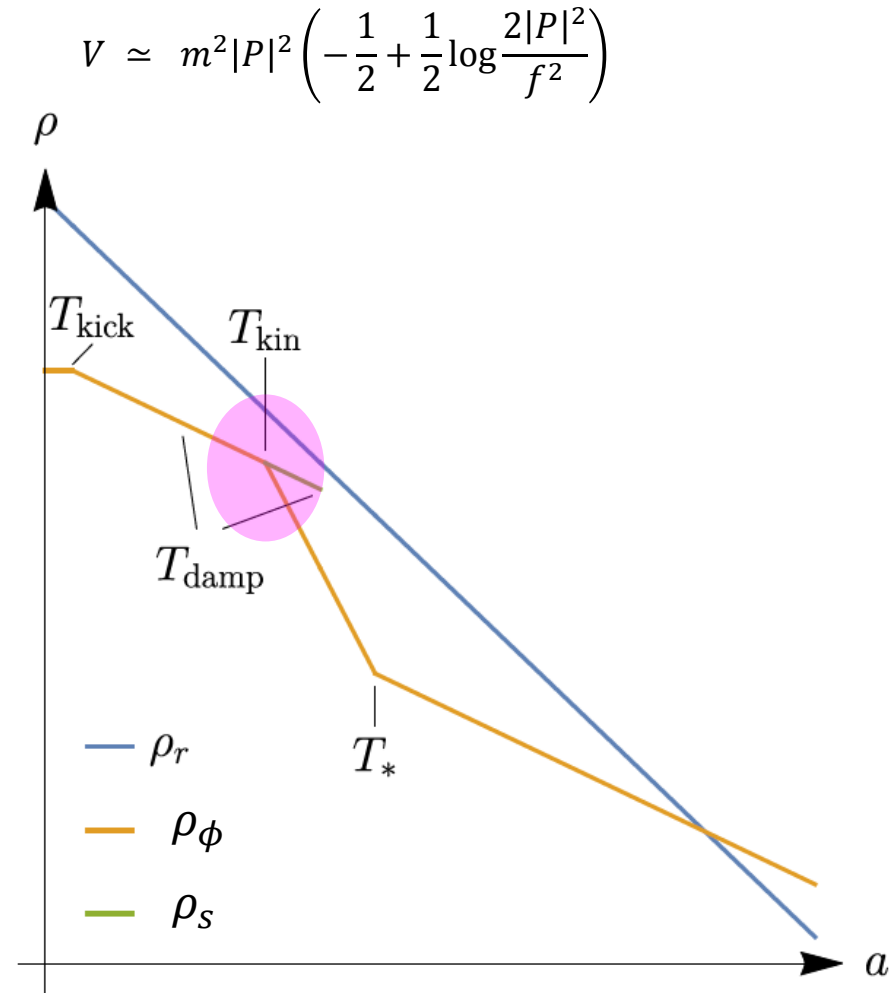
$$\phi_{early} \sim (HM^{n-3})^{\frac{1}{n-2}}$$

ϕ starts to roll

$$m \sim H, \quad T_{kick} \sim \sqrt{mM_{pl}}$$

Energy in s dissipates (via, e.g., $L \sim s\bar{\chi}\chi$)

Nonzero $\dot{\phi} \propto a^{-3}$ survives



[Eröncel, RS, Sørensen, Servant, in preparation]

A thermal history

Tachyonic mass drives Large VEV

$$\phi_{early} \sim (HM^{n-3})^{\frac{1}{n-2}}$$

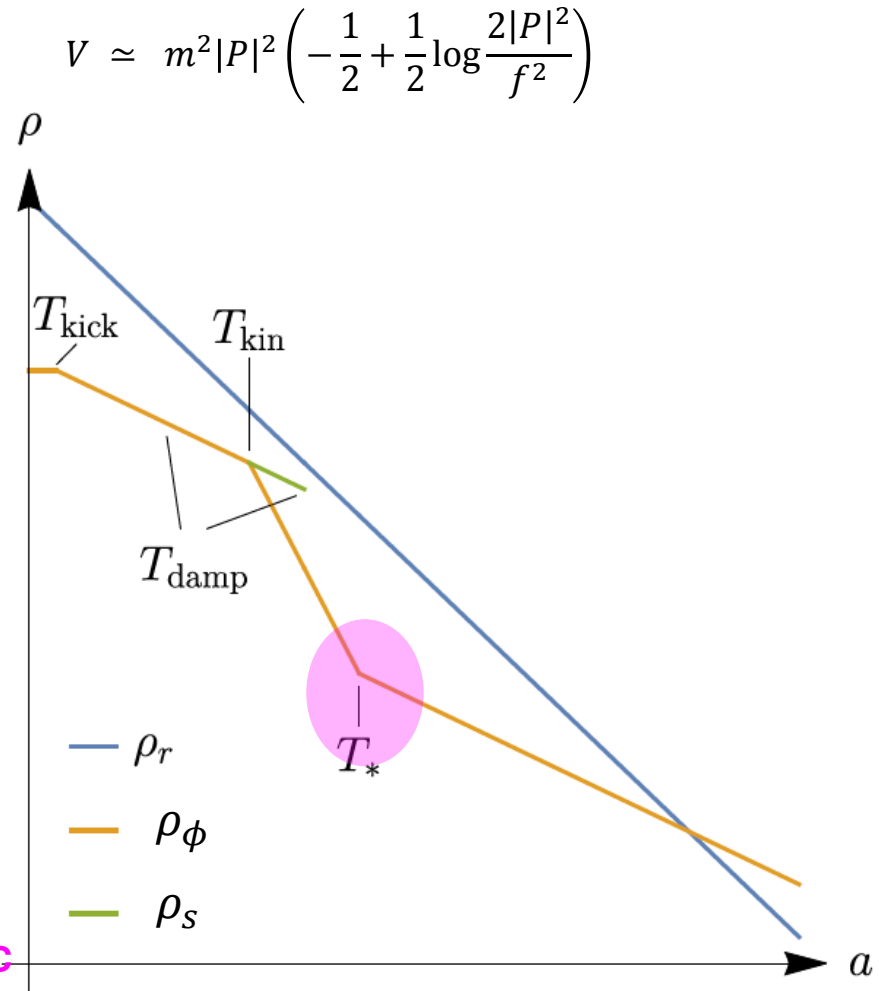
ϕ starts to roll

$$m \sim H, \quad T_{kick} \sim \sqrt{mM_{pl}}$$

Energy in s dissipates (via, e.g., $L \sim s\bar{\chi}\chi$)

Nonzero $\dot{\phi} \propto a^{-3}$ survives

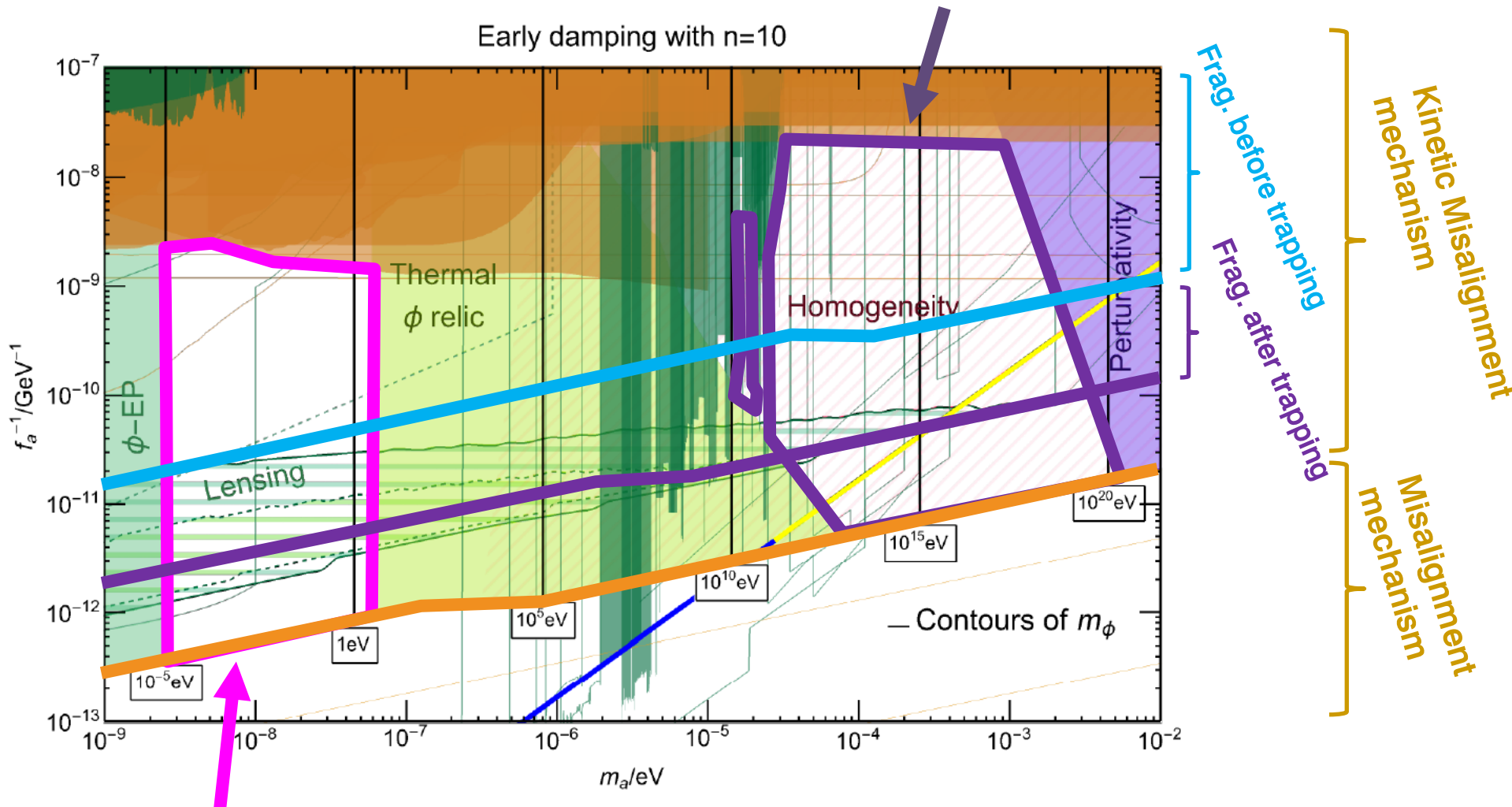
Trapping by potential, fragmentation, etc



[Eröncel, RS, Sørensen, Servant, in preparation]

パラメータ空間

**Initial adiabatic fluctuation could dominate
(depending on inflation scenario)**



Kinetic misalignment (+ fragmentation)

まとめ

素粒子・初期宇宙の未解決問題：

1. ニュートリノの質量の起源は何か？
2. 暗黒物質の正体は何か？なぜこの宇宙に存在するのか？
3. 物質と反物質の非対称性はどのようにして生まれたのか？

E01班のアプローチ：

(ア) レプトジェネシス

(イ) WIMPやアクシオンにまたがる暗黒物質の総合的研究

(ウ) (ア)および(イ)を含む、素粒子模型および初期宇宙史の研究