



宇宙の再加熱・熱化

高エネルギー標準模型粒子のカスケード

向田 享平 @ KEK, 総研大

1312.3097, 1402.2846, 1901.11027, **2208.11708**

導入

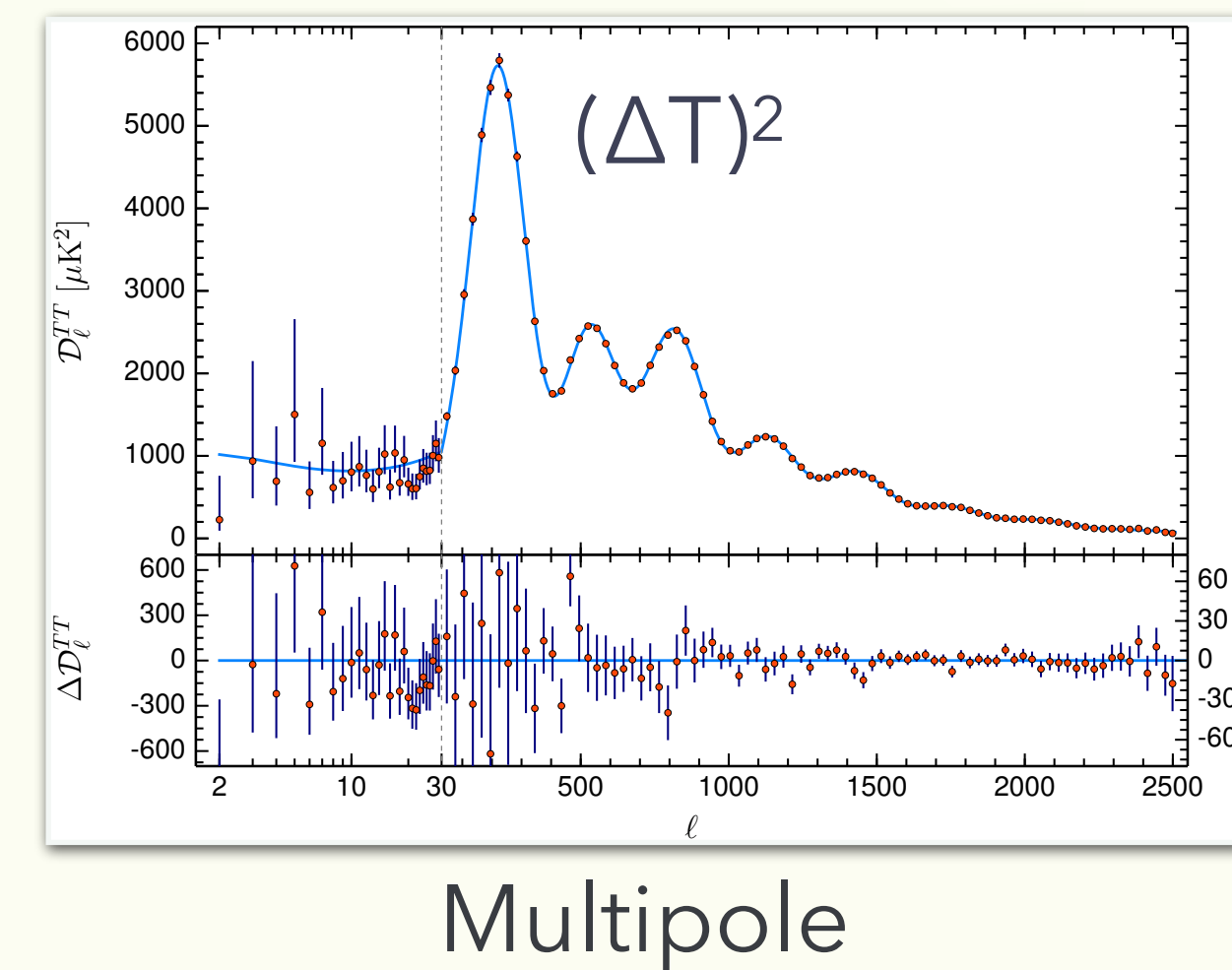
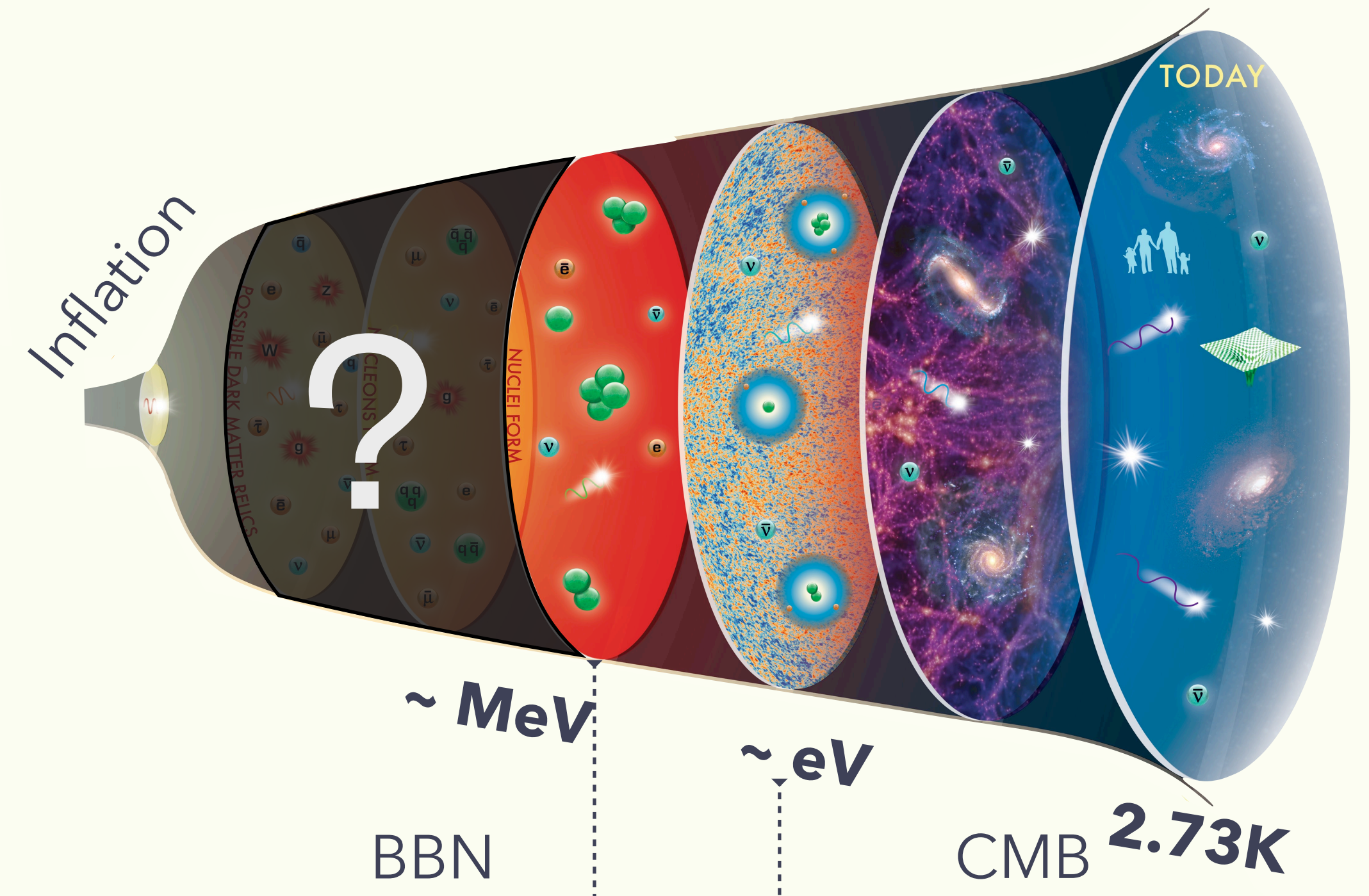
インフレーション宇宙論

- インフレーション

- 地平線・平坦性問題を解く
- 宇宙構造形成の種を与える
- やや赤傾したスペクトルを予言する

- ビッグバン軽元素合成 (BBN)

- 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

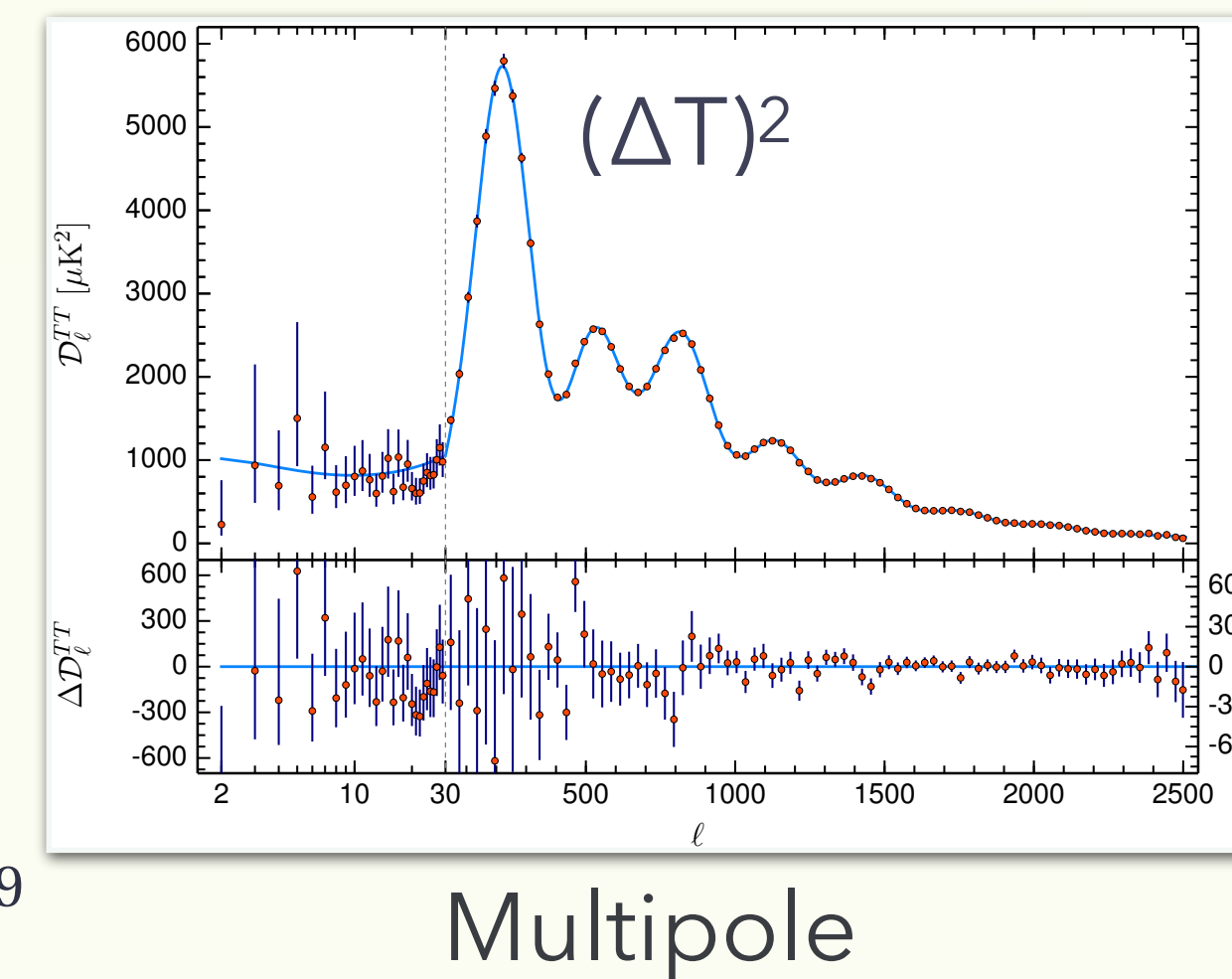
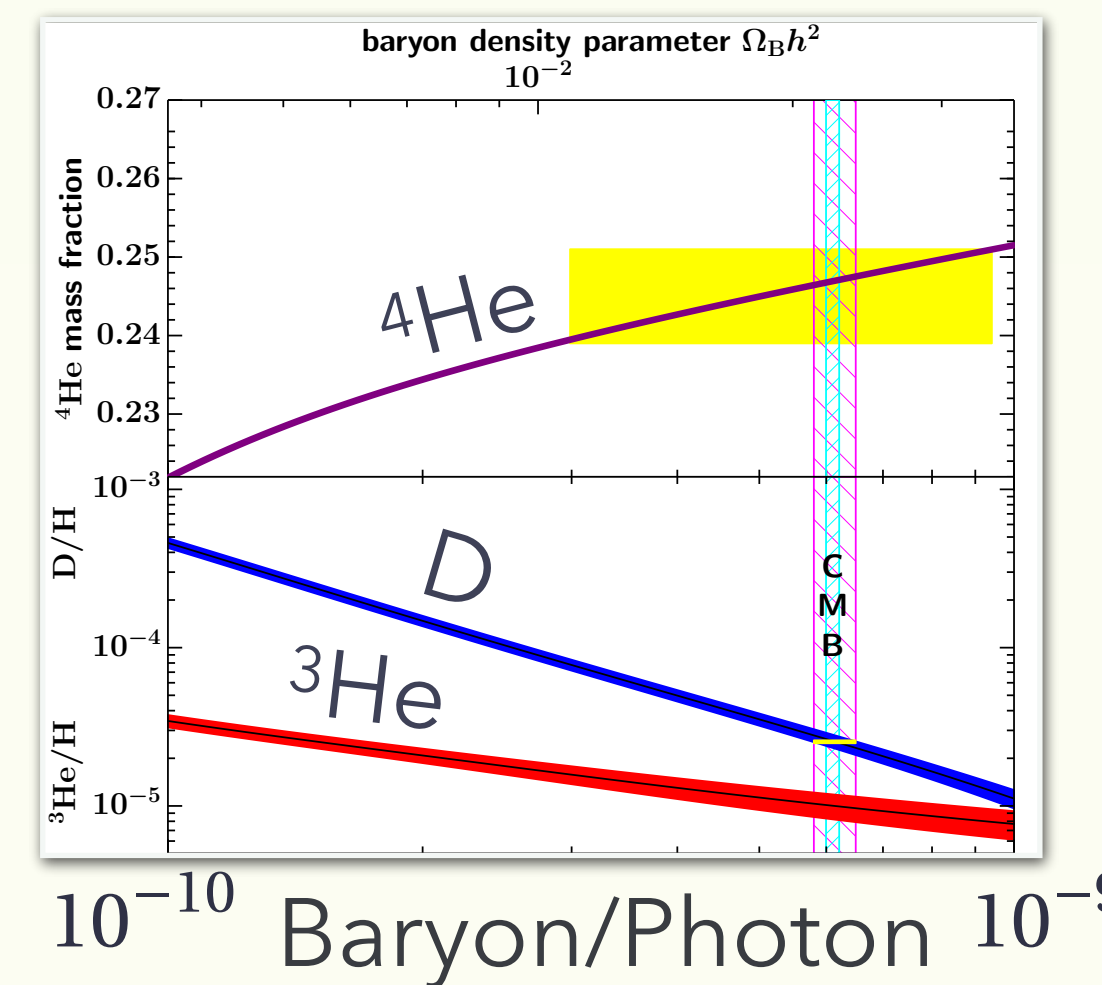
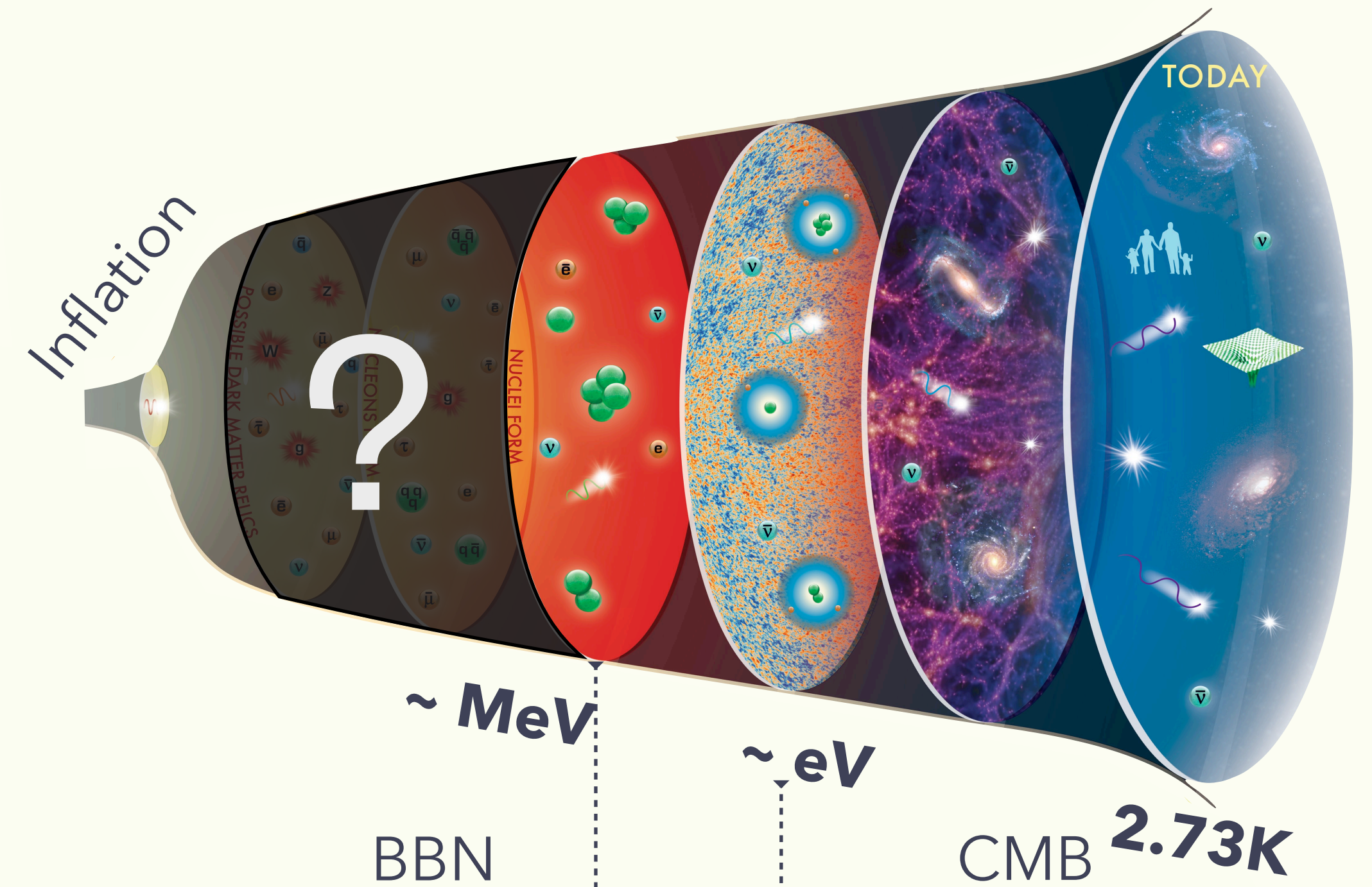


インフレーション宇宙論

- インフレーション
 - 地平線・平坦性問題を解く
 - 宇宙構造形成の種を与える
 - やや赤傾したスペクトルを预言する

- ビッグバン軽元素合成 (BBN)

- 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

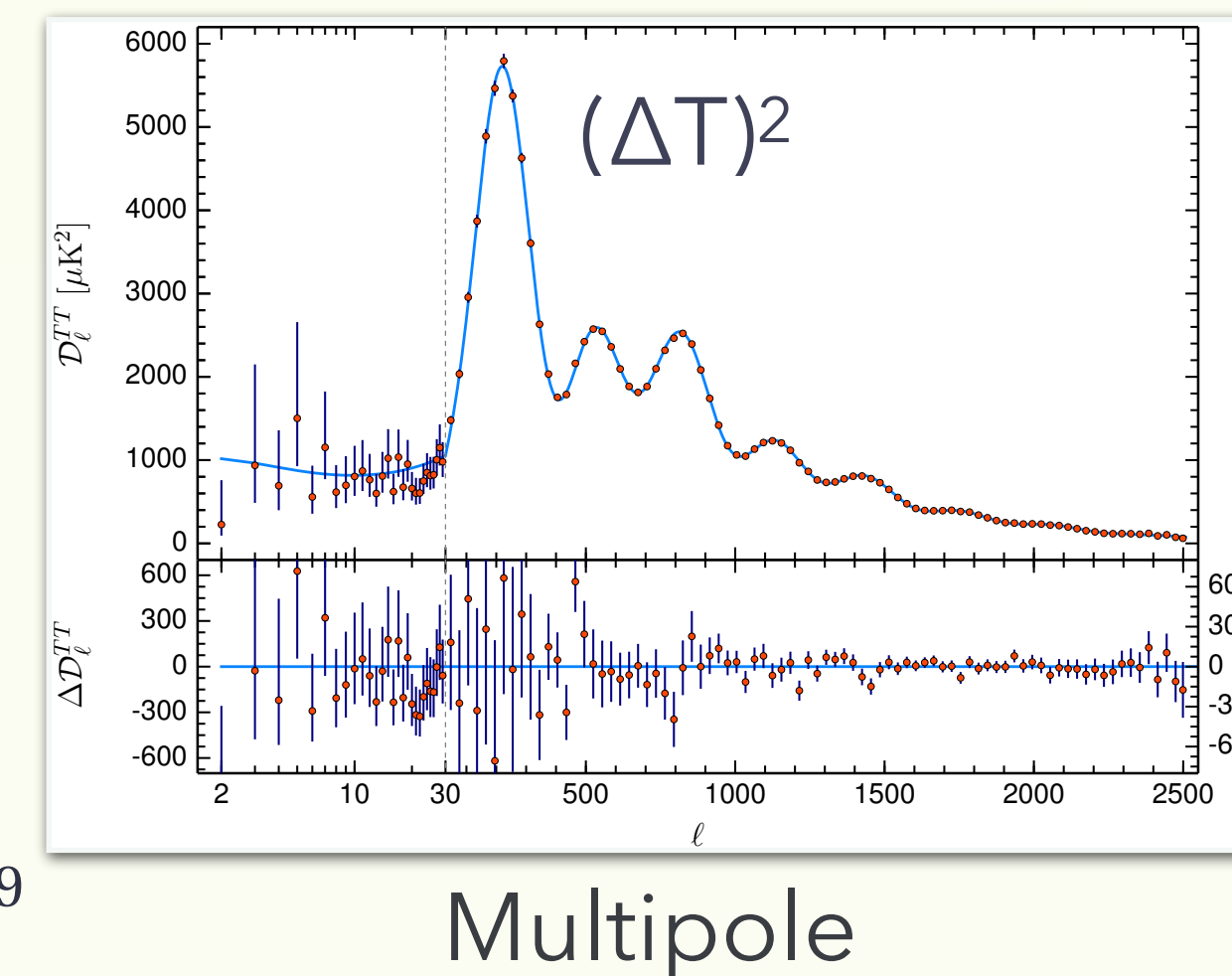
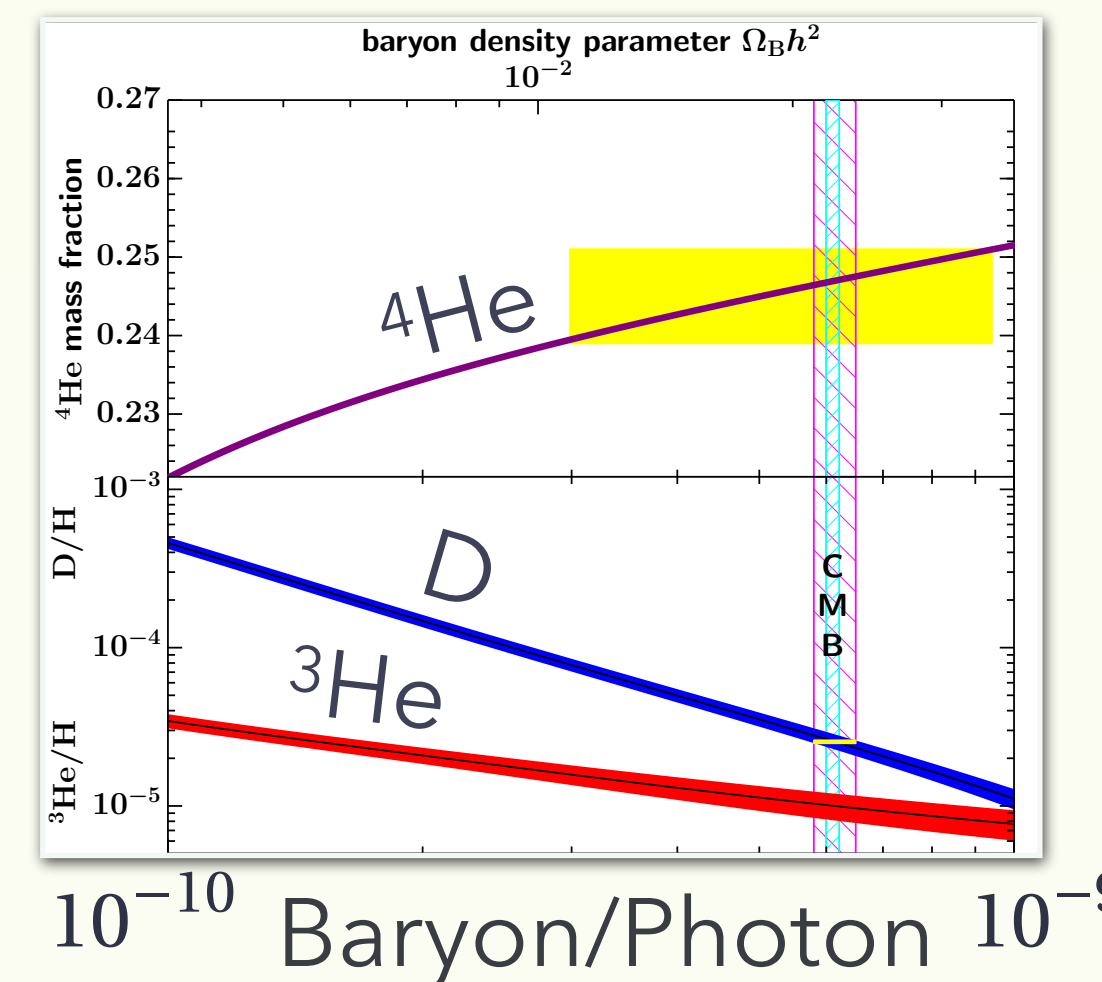
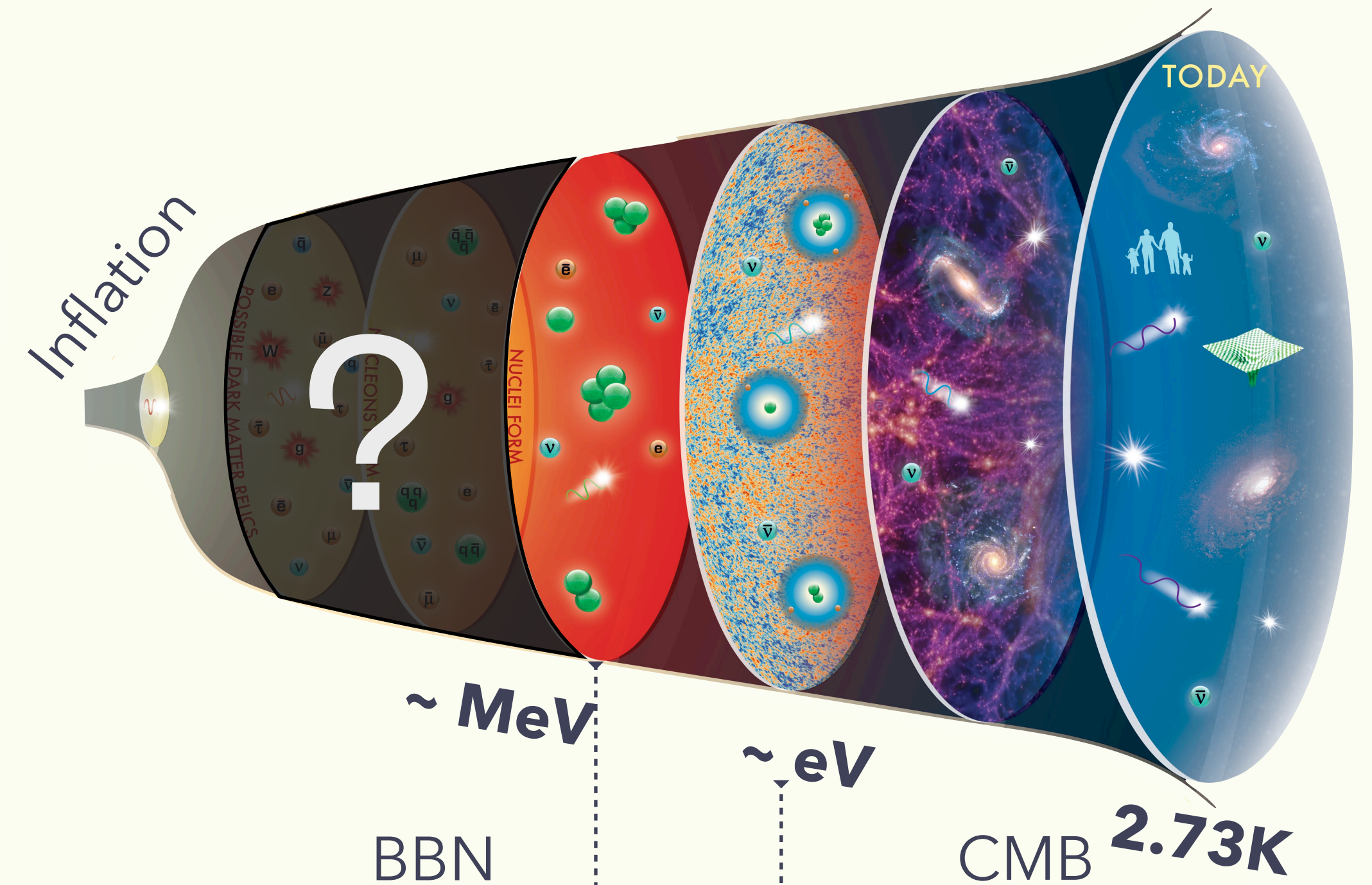


インフレーション宇宙論

- インフレーション
 - 地平線・平坦性問題を解く
 - 宇宙構造形成の種を与える
 - やや赤傾したスペクトルを予言する

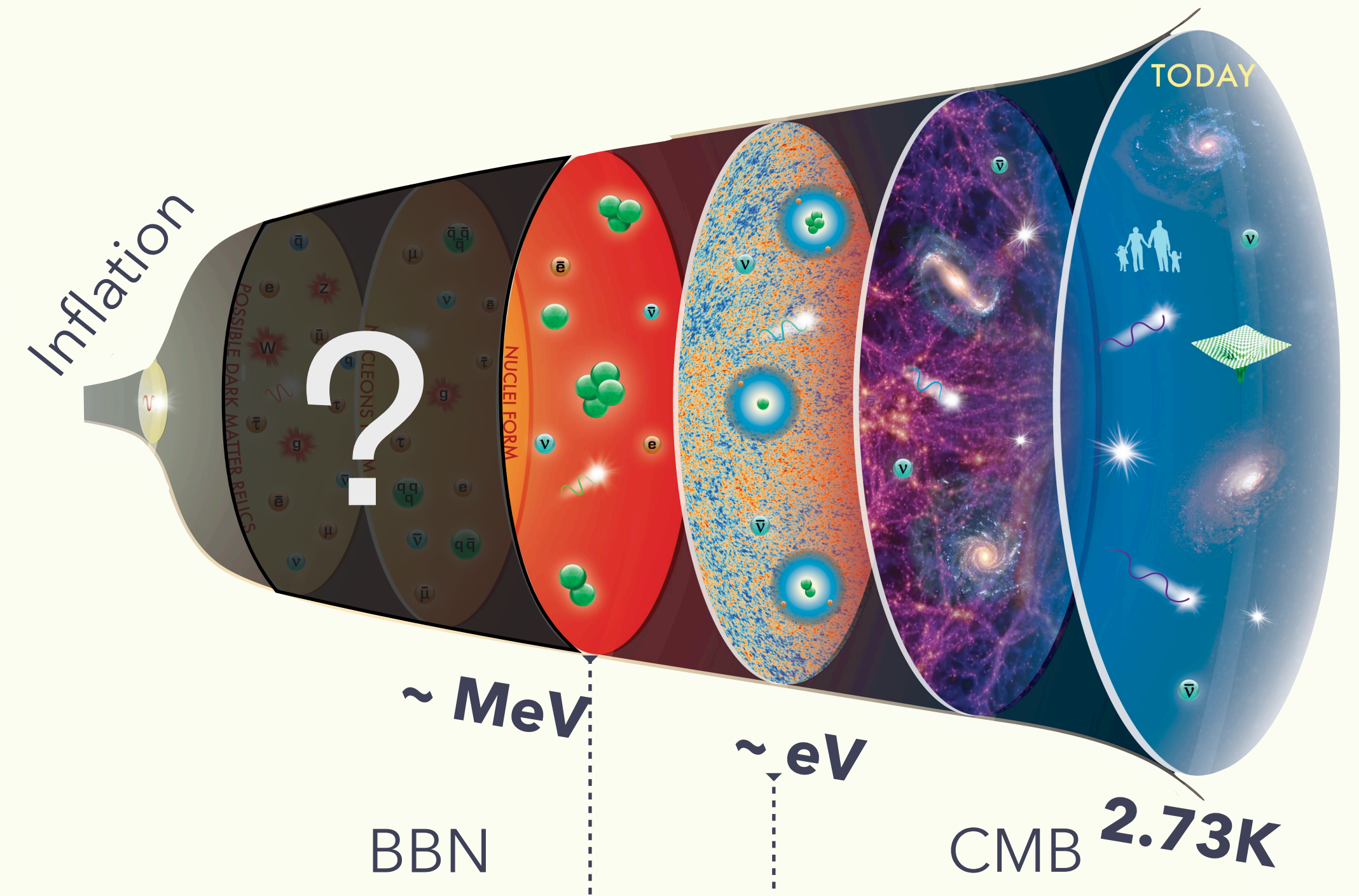
熱プラズマ

- ビッグバン軽元素合成 (BBN)
- 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)



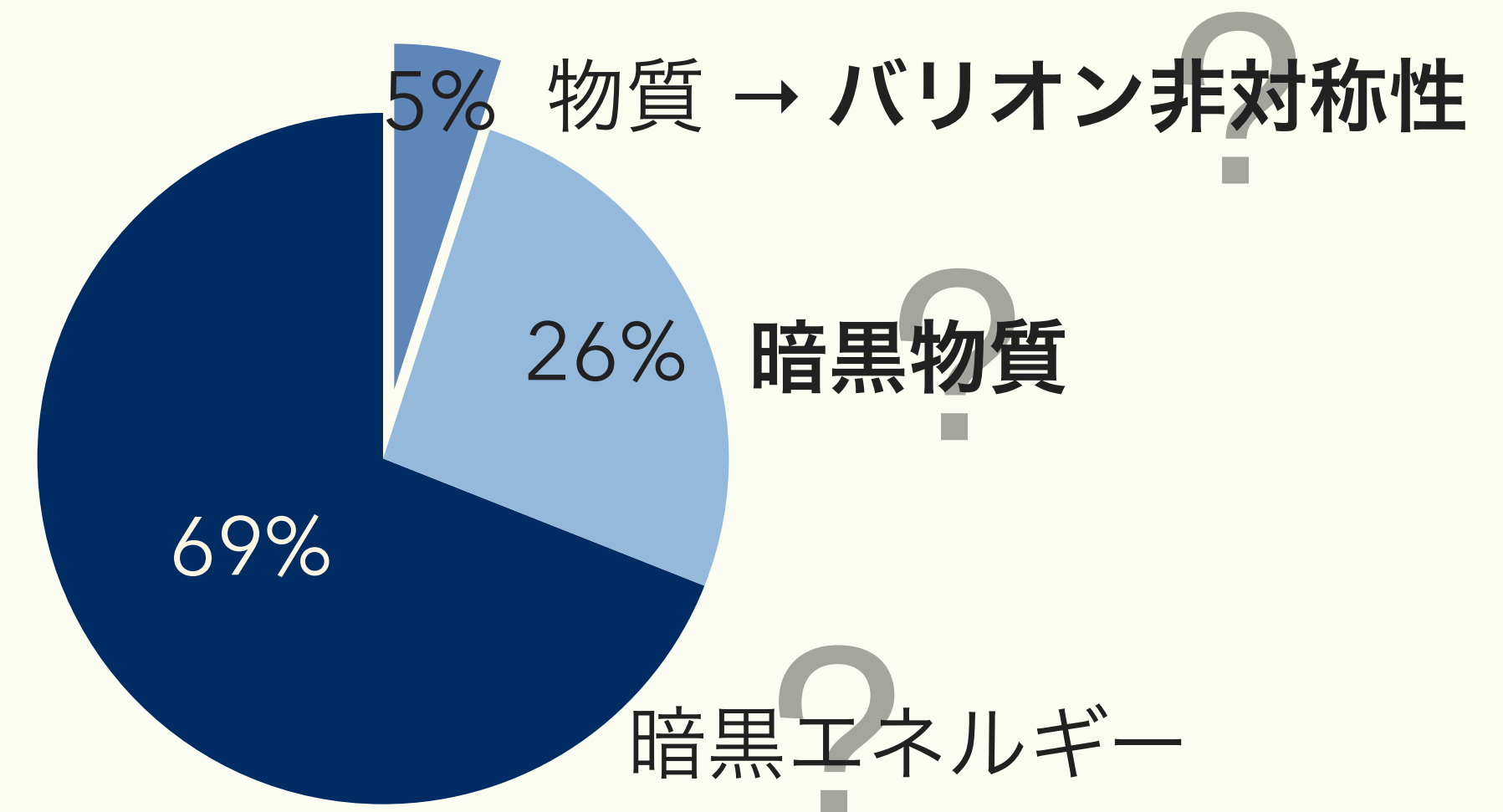
インフレーション宇宙論

- インフレーション
 - 地平線・平坦性問題を解く
 - 宇宙構造形成の種を与える
 - やや赤傾したスペクトルを预言する



熱プラズマ

- ビッグバン軽元素合成 (BBN)
- 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)



インフレーション宇宙論

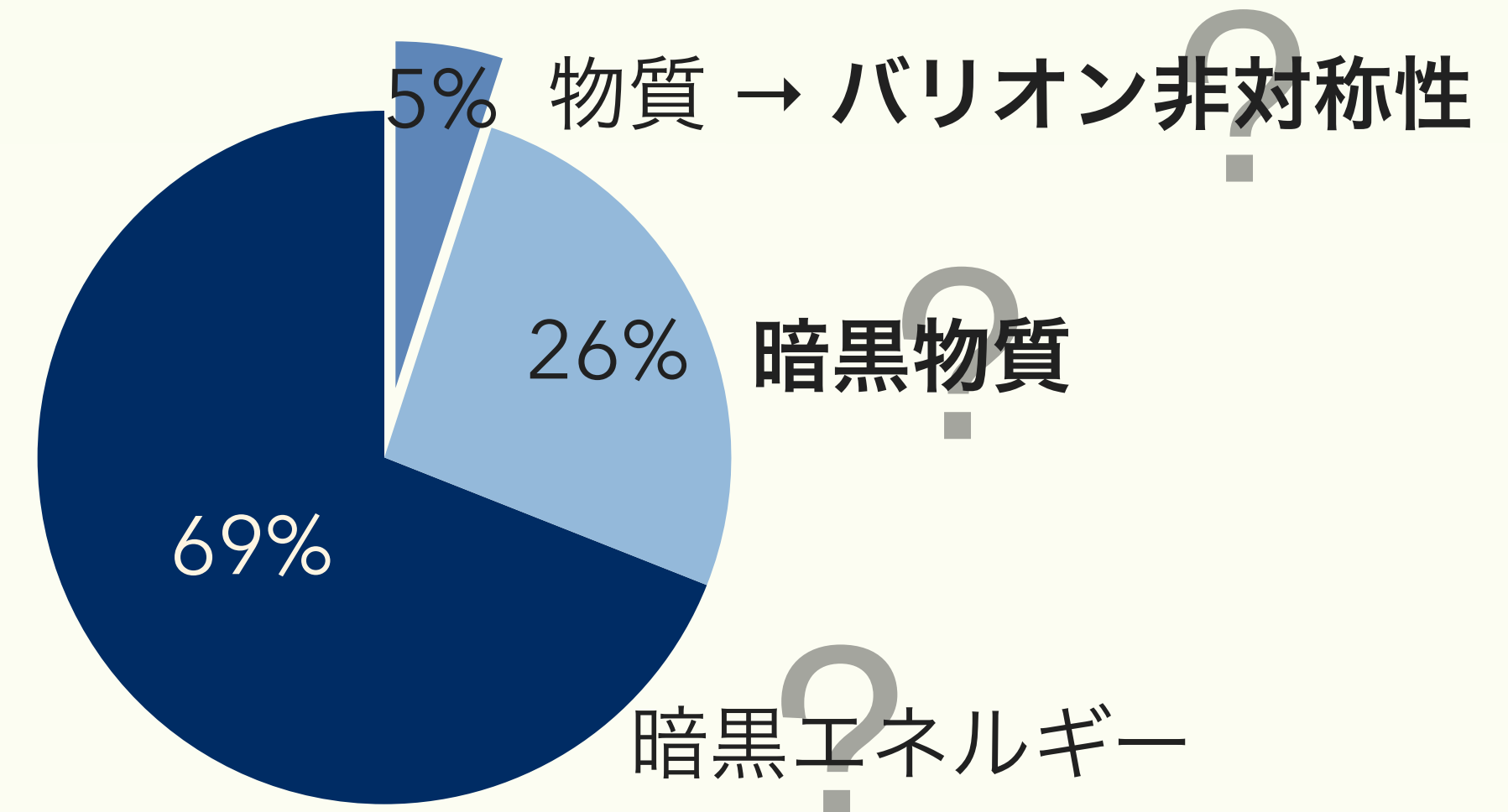
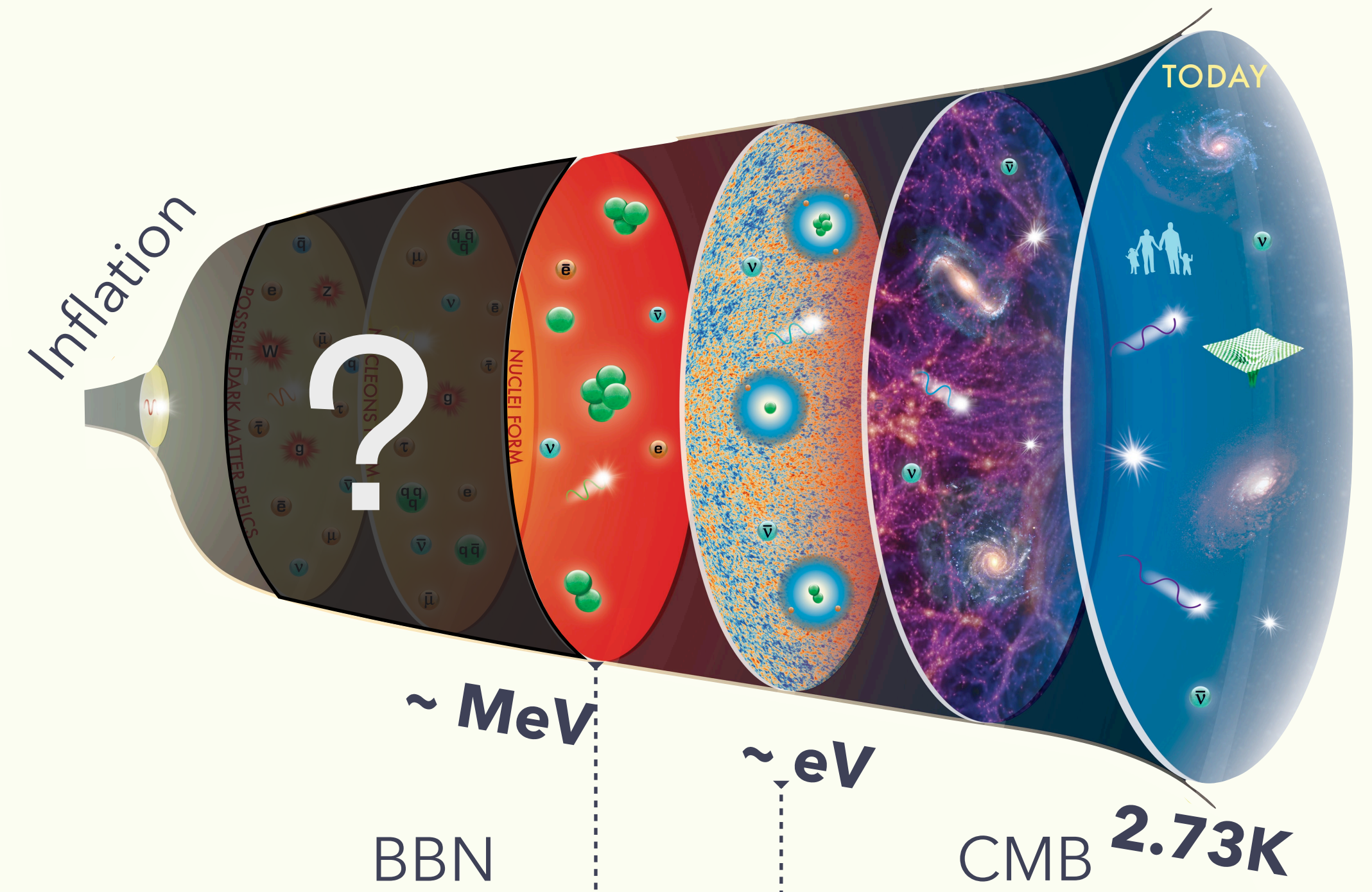
- インフレーション
 - 地平線・平坦性問題を解く
 - 宇宙構造形成の種を与える
 - やや赤傾したスペクトルを预言する

?

再加熱・熱化

熱プラズマ

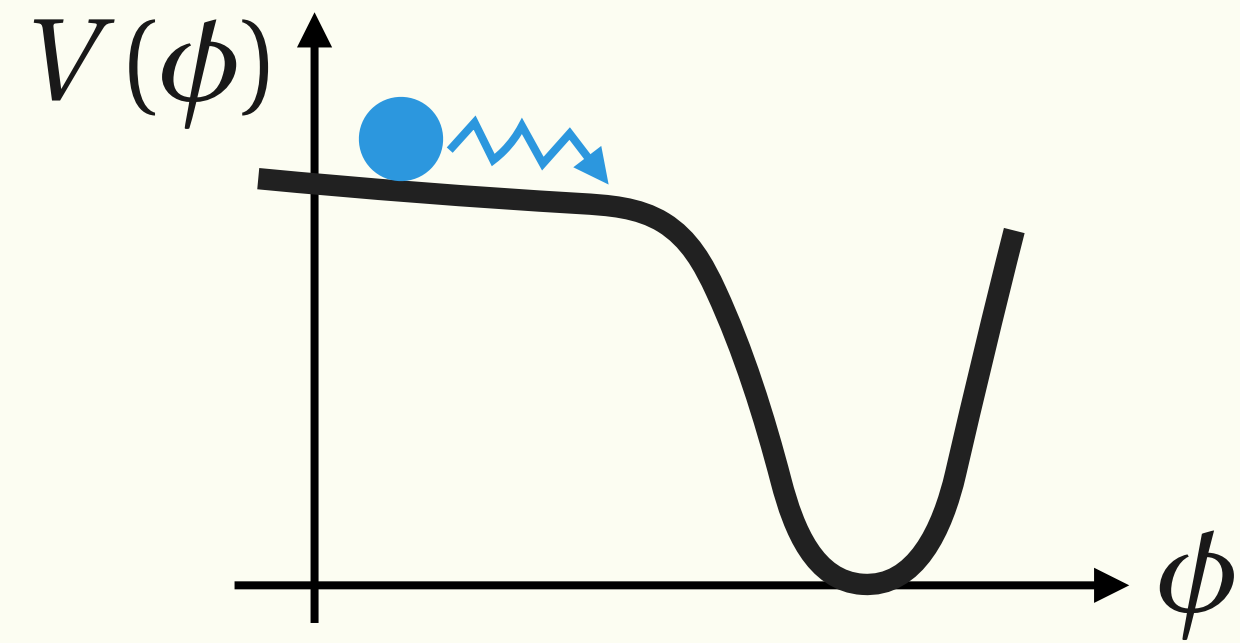
- ビッグバン軽元素合成 (BBN)
- 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)



トークの概要

- 導入
- インフレーション後の宇宙の再加熱・熱化
- 高エネルギー標準模型粒子の媒質中でのカスケード

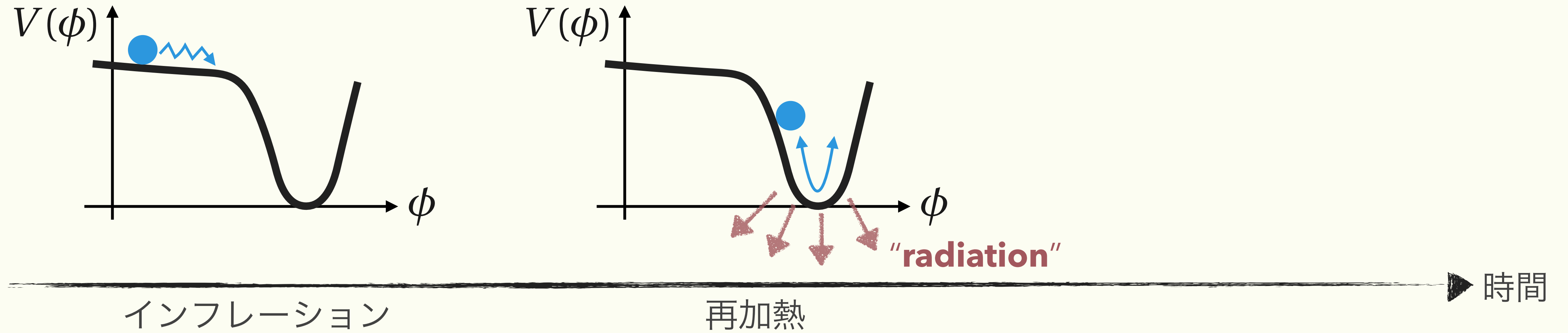
インフレーション後の宇宙の再加熱の概略



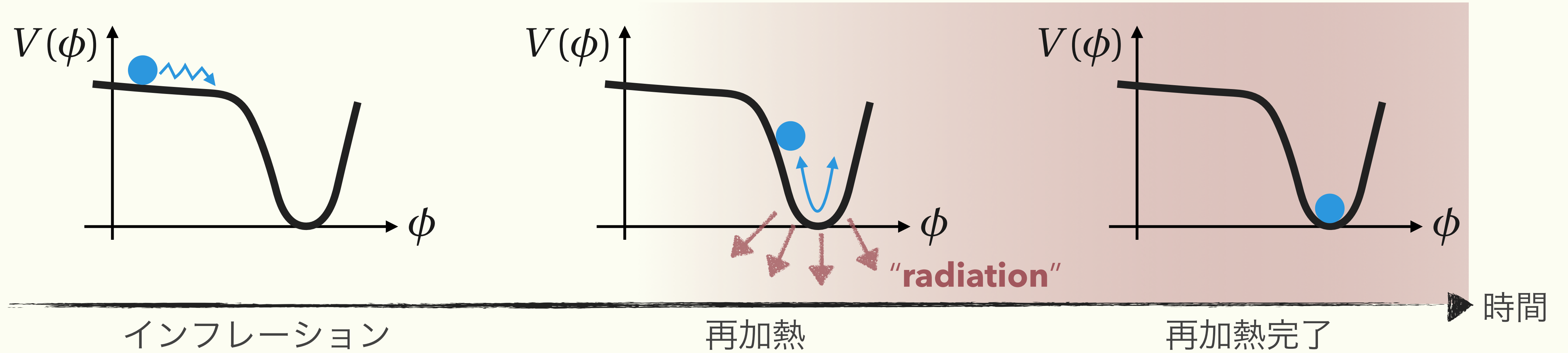
インフレーション

時間

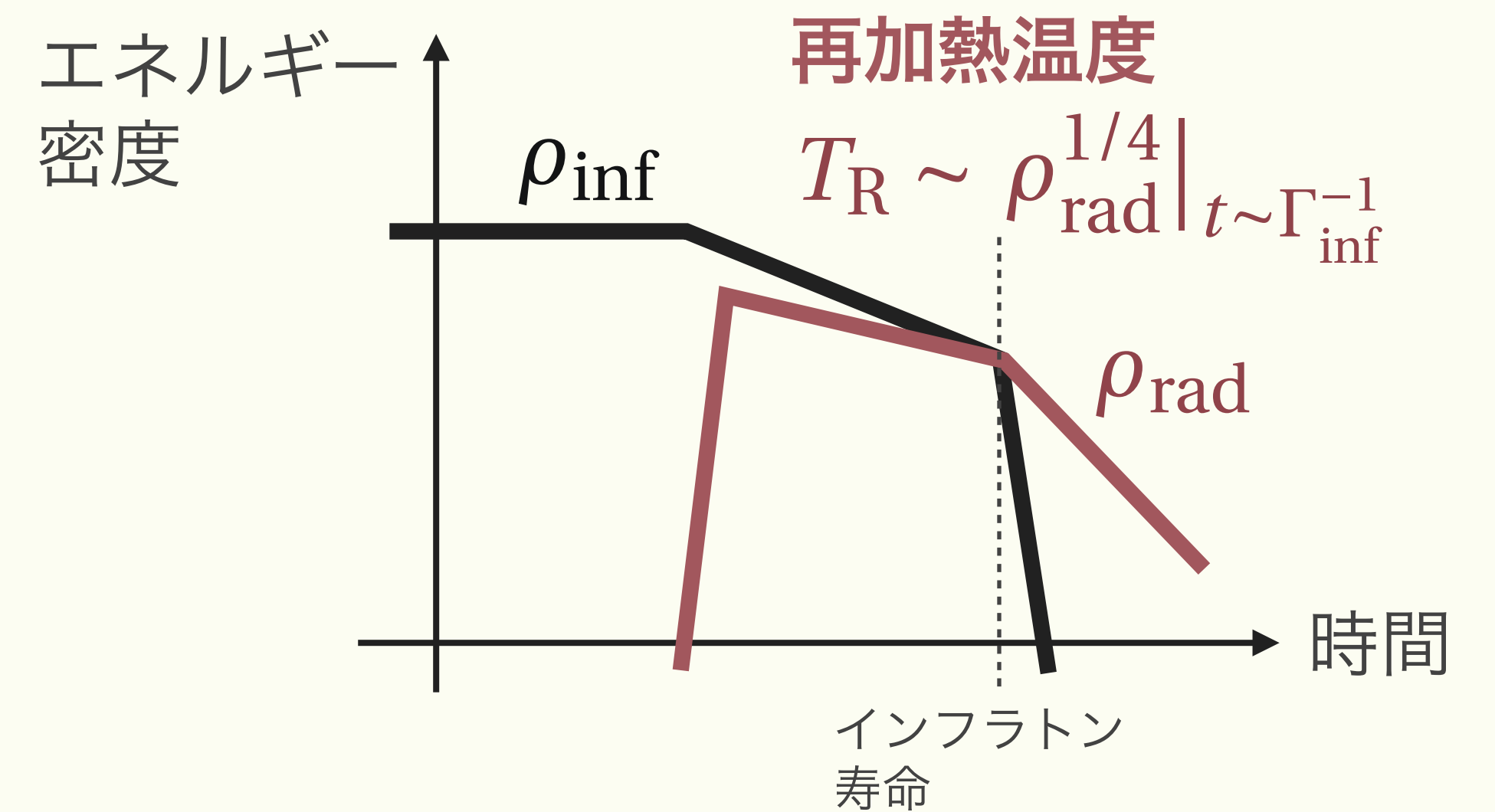
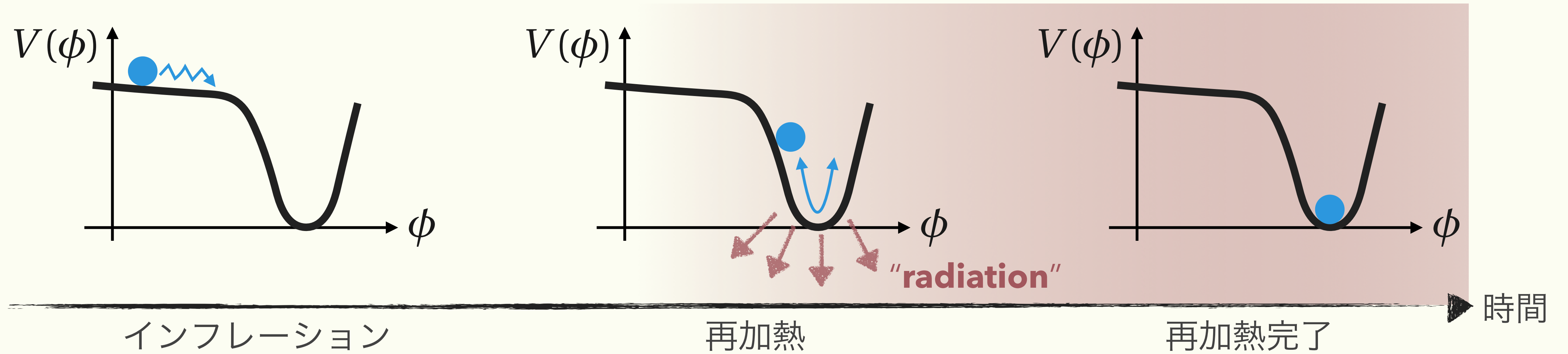
インフレーション後の宇宙の再加熱の概略



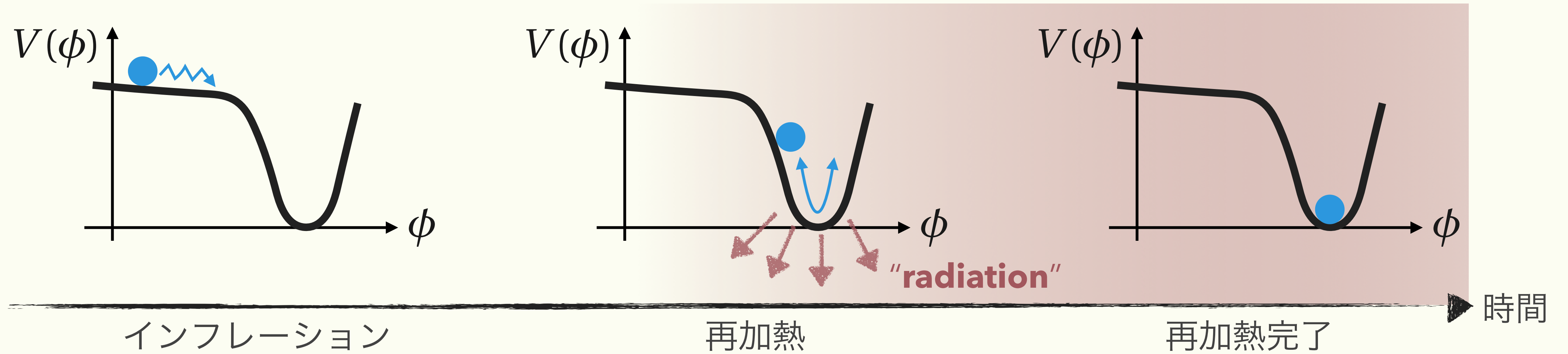
インフレーション後の宇宙の再加熱の概略



インフレーション後の宇宙の再加熱の概略



インフレーション後の宇宙の再加熱の概略

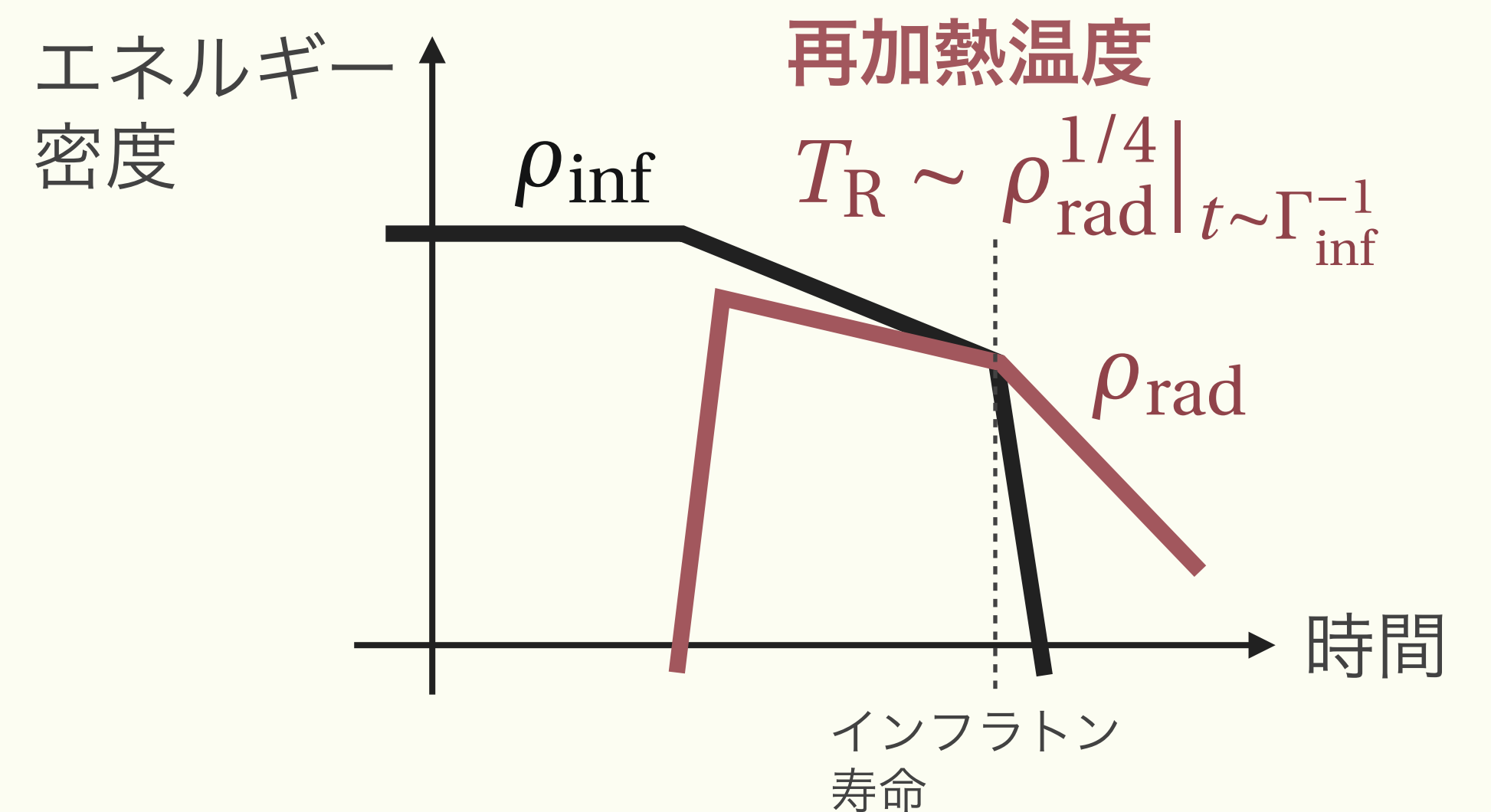


- 観測的にはほぼ何も分かってない。

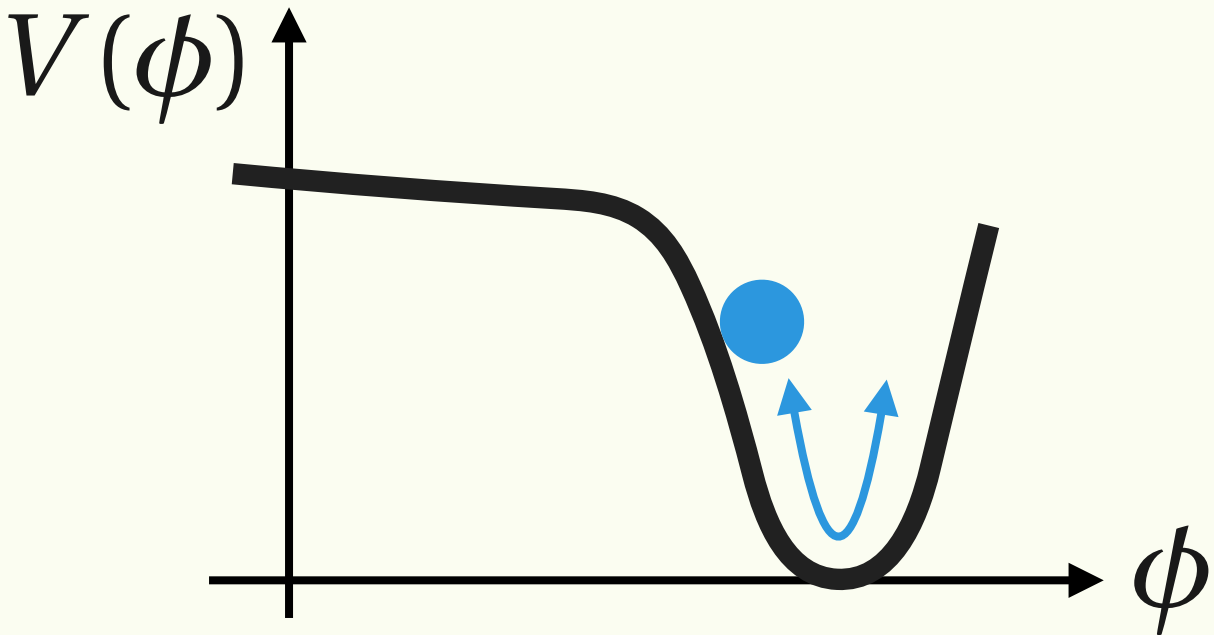
$$10^{16} \text{ GeV} \gtrsim T_R \gtrsim 1 \text{ MeV}$$

- 宇宙の熱史に大きな影響

- バリオン非対称性, 暗黒物質生成, 宇宙の相転移, ...



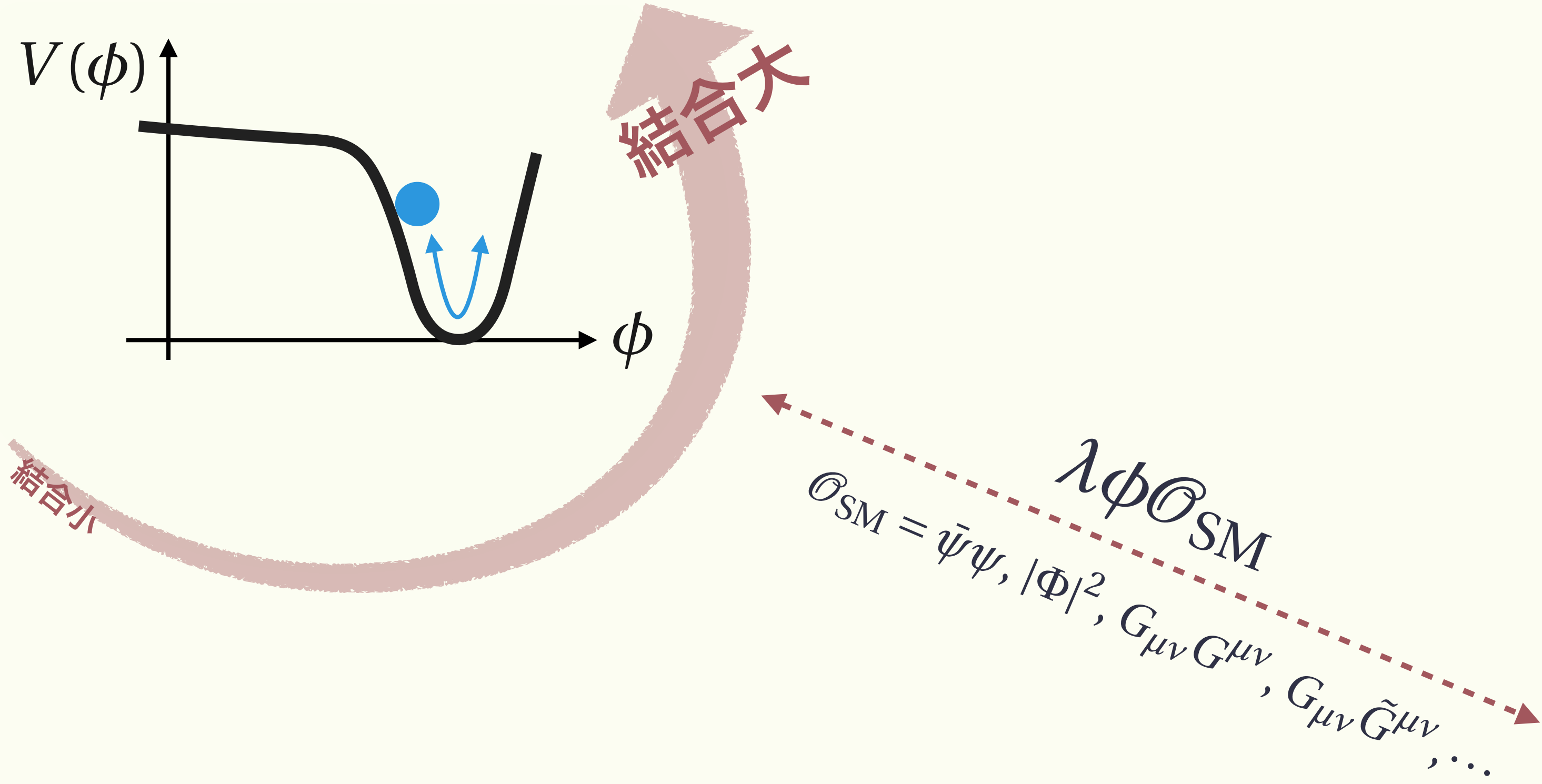
再加熱・熱化



$\lambda\phi\mathcal{O}_{SM}$
 $\mathcal{O}_{SM} = \bar{\psi}\psi, |\Phi|^2, G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}, G_{\mu\nu}\tilde{G}^{\mu\nu}, \dots$

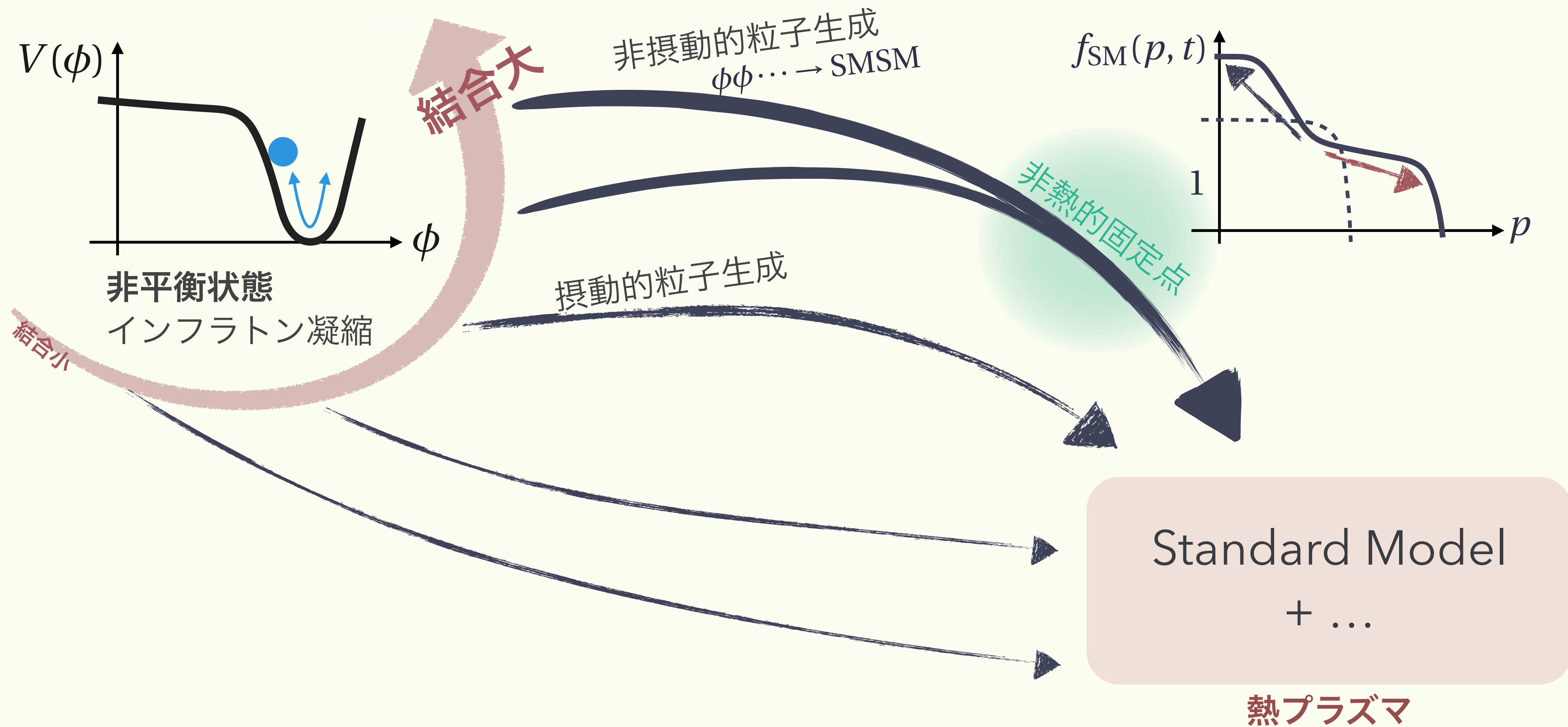
Standard Model
+ ...

再加熱・熱化

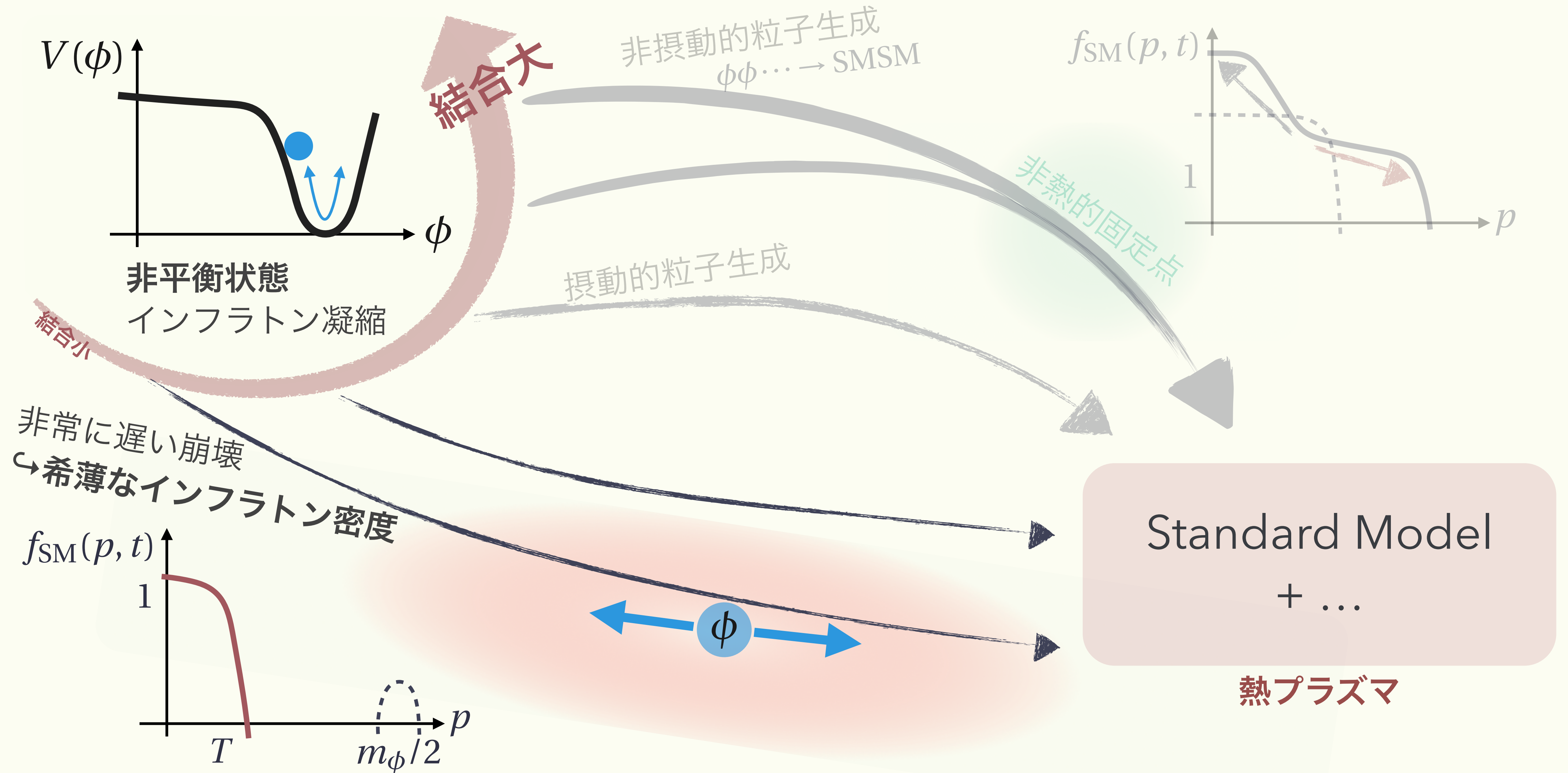


Standard Model
+ ...

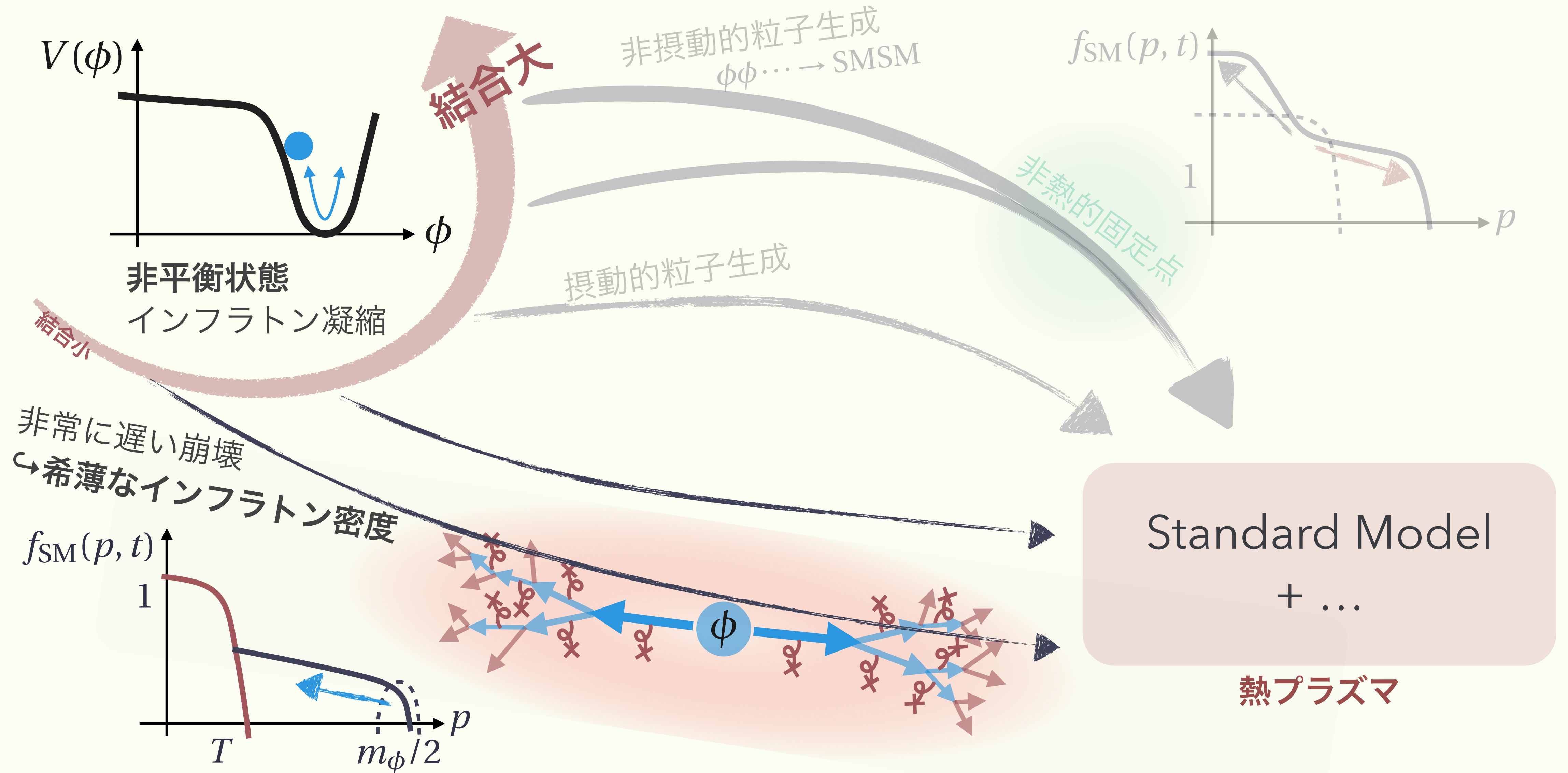
再加熱・熱化



再加熱・熱化



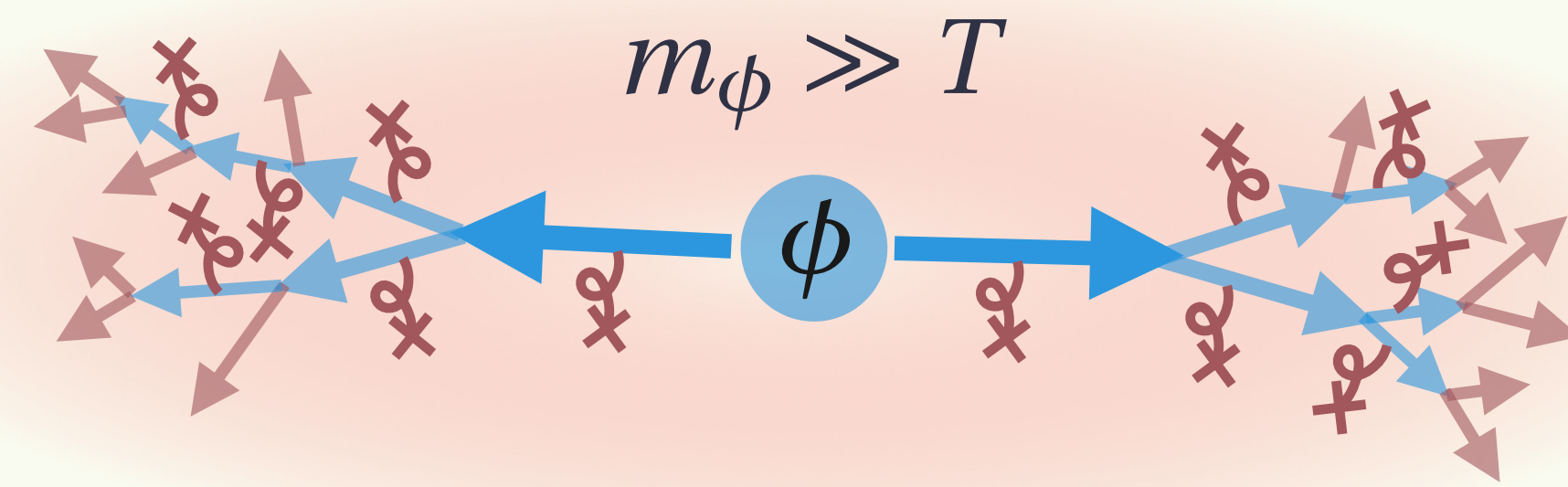
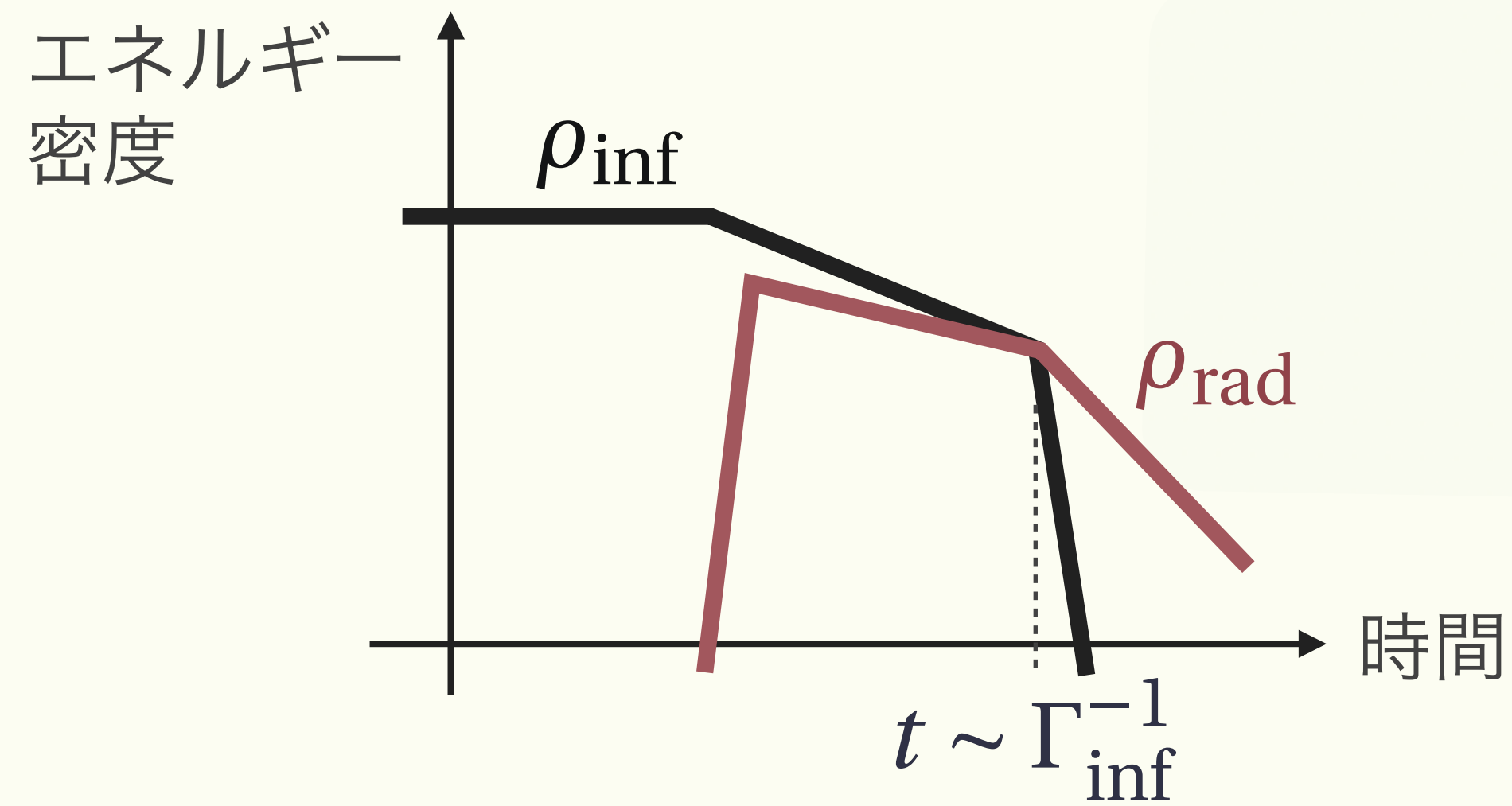
再加熱・熱化



トークの概要

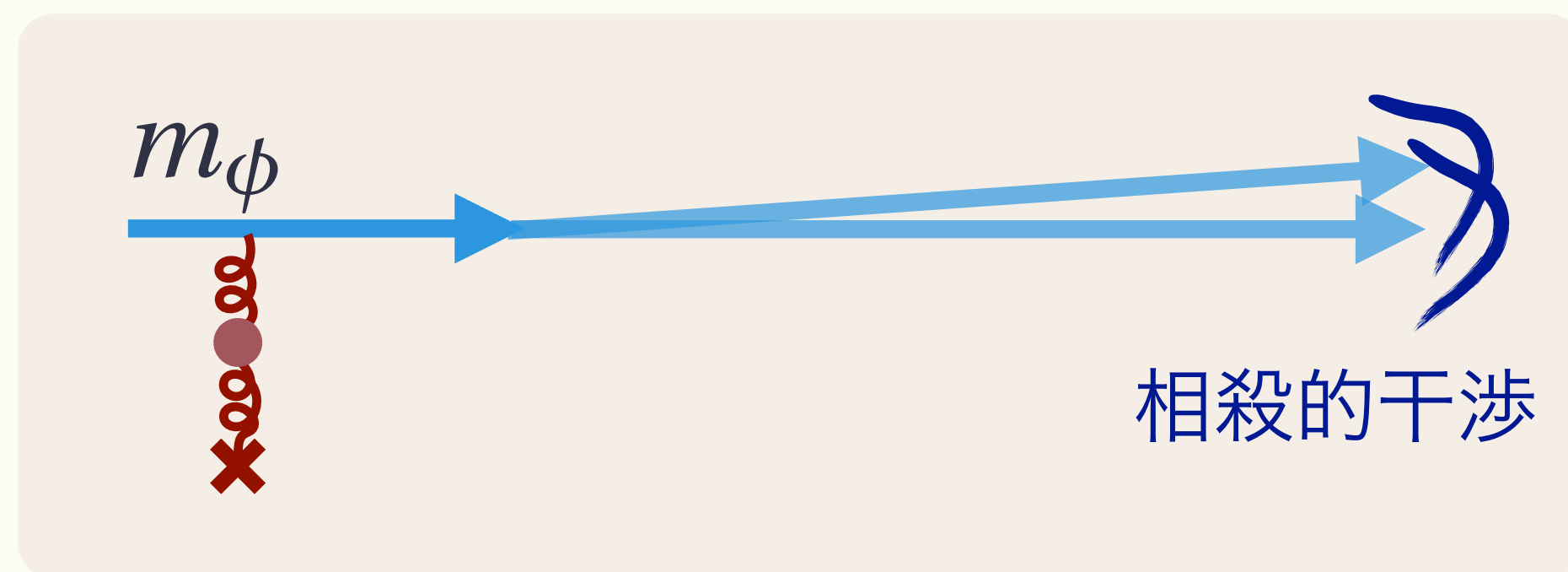
- 導入
- インフレーション後の宇宙の再加熱・熱化
- 高エネルギー標準模型粒子の媒質中でのカスケード

長寿命インフラトンと希薄な熱プラズマ

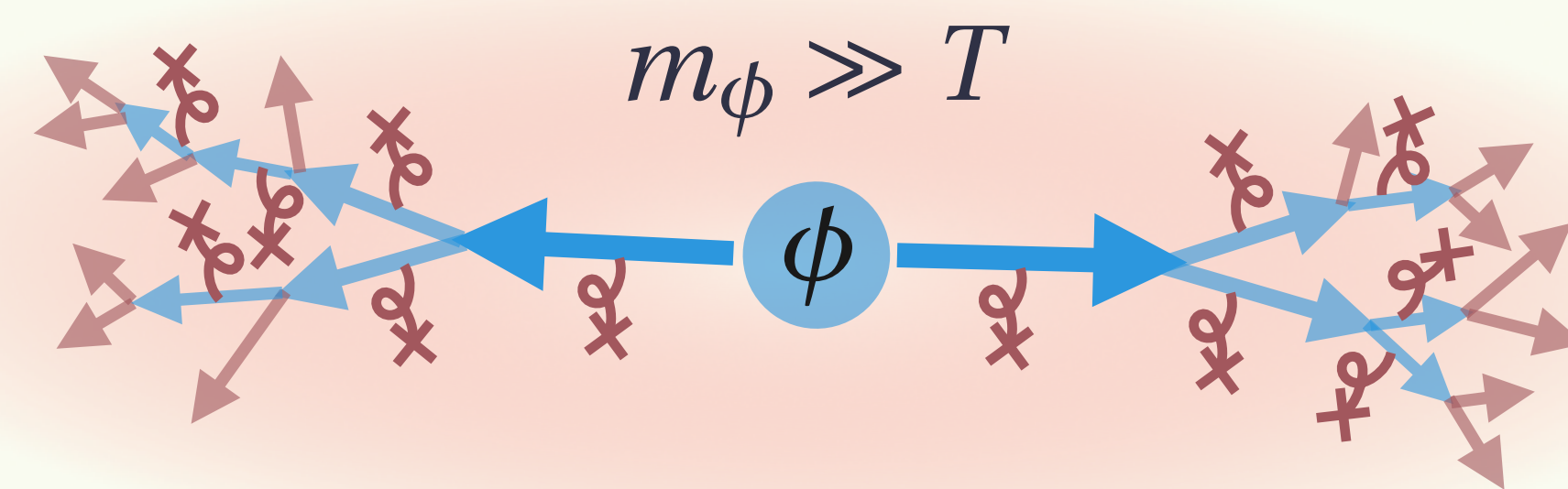
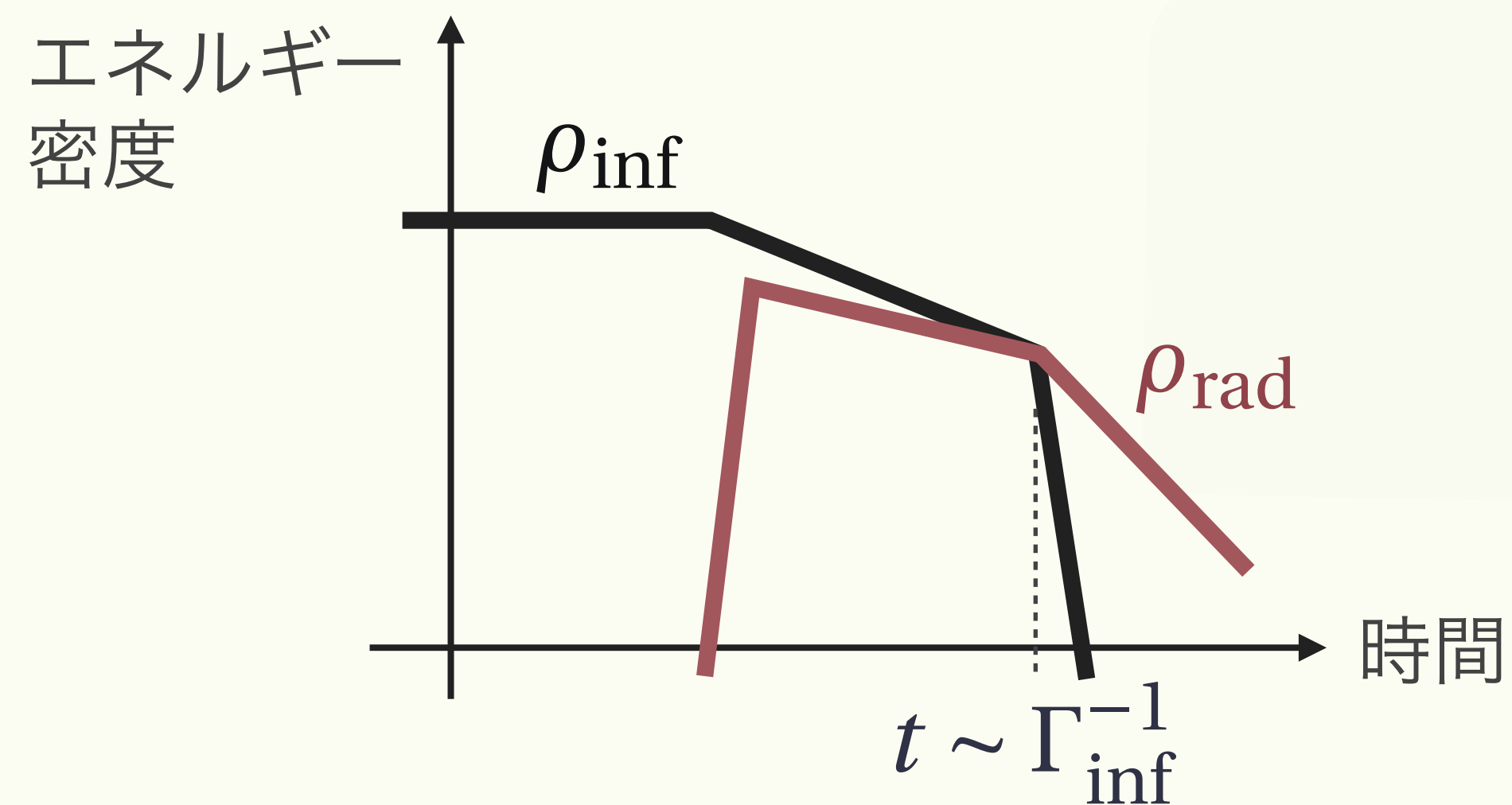


- 宇宙時間で熱化する条件
 律速 $\rightarrow \Gamma_{\text{split}} > H \leftarrow$ 宇宙膨張率

- Landau-Pomeranchuk-Migdal 効果

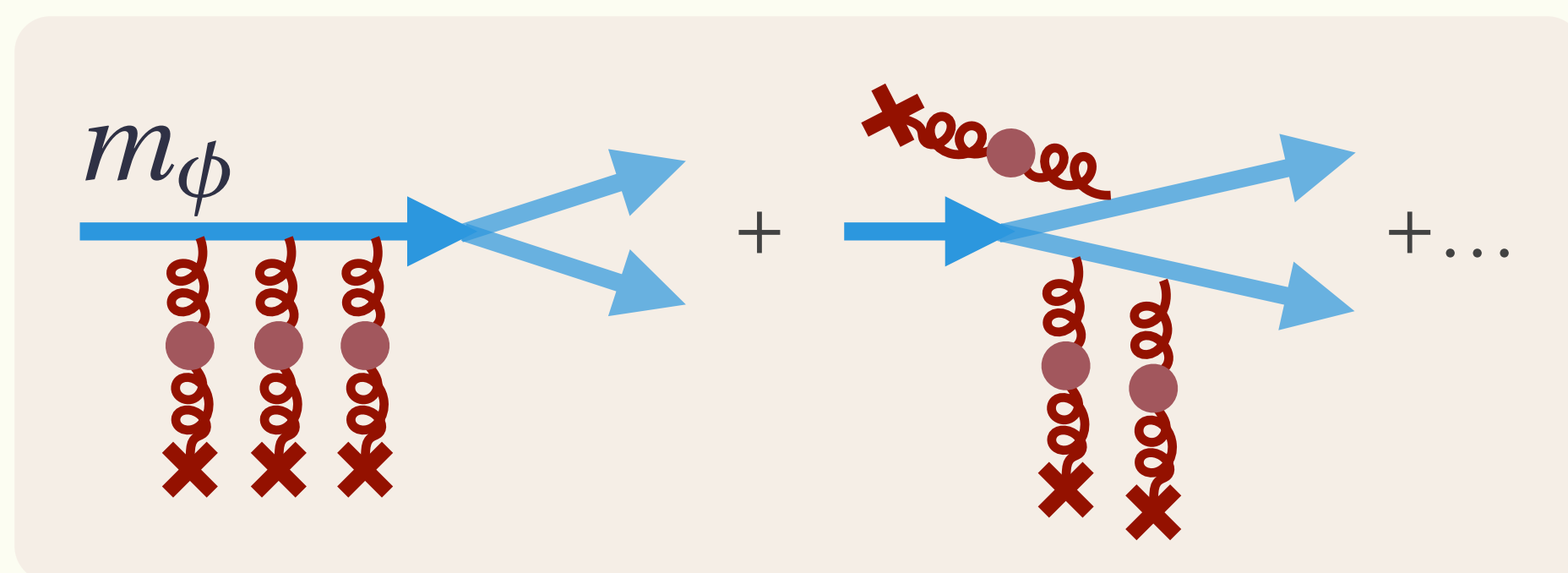


長寿命インフラトンと希薄な熱プラズマ



- 宇宙時間で熱化する条件
 律速 $\rightarrow \Gamma_{\text{split}} > H \leftarrow$ 宇宙膨張率

- Landau-Pomeranchuk-Migdal 効果 [Landau, Pomeranchuk; Migdal]

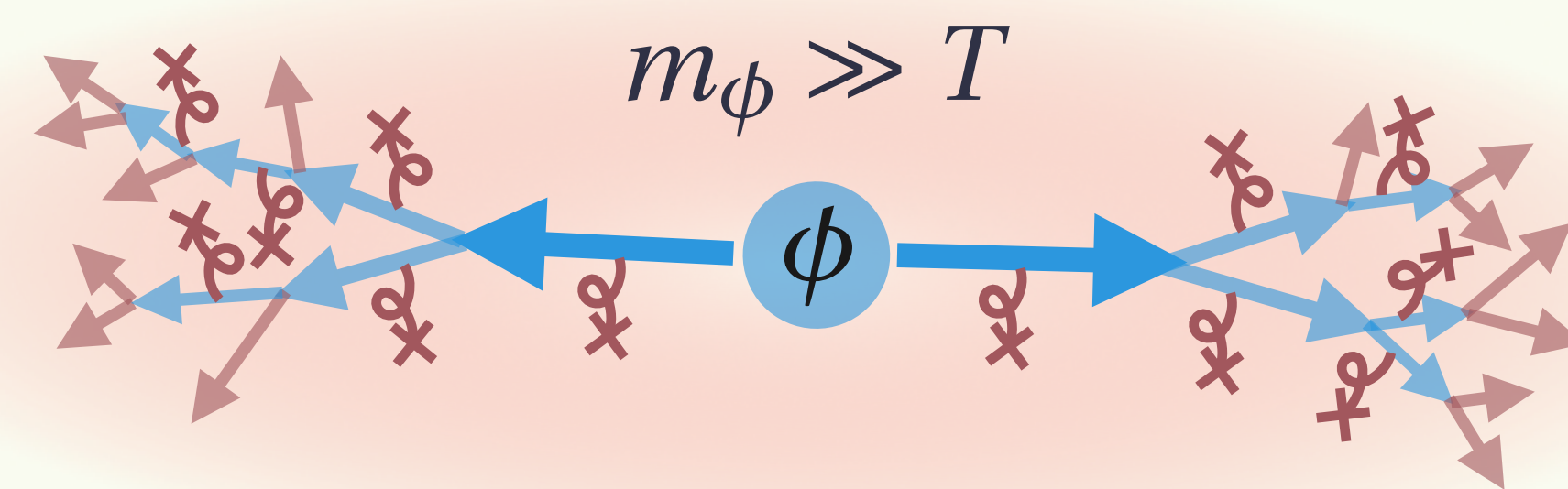
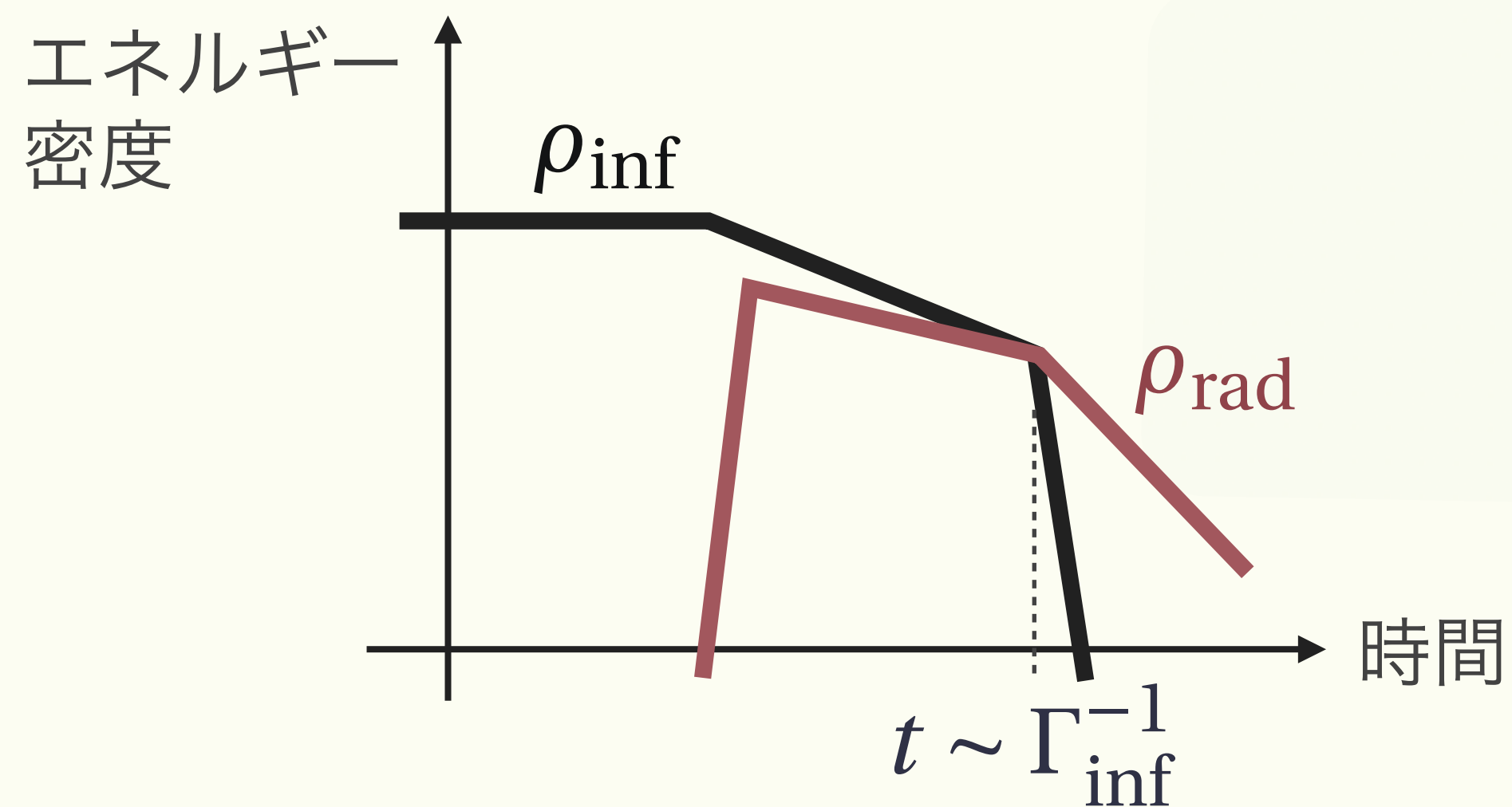


$$\Gamma_{\text{split}} \sim \alpha^2 T \times \sqrt{\frac{T}{m_\phi}}$$

Bethe-Heitler **LPM抑制**

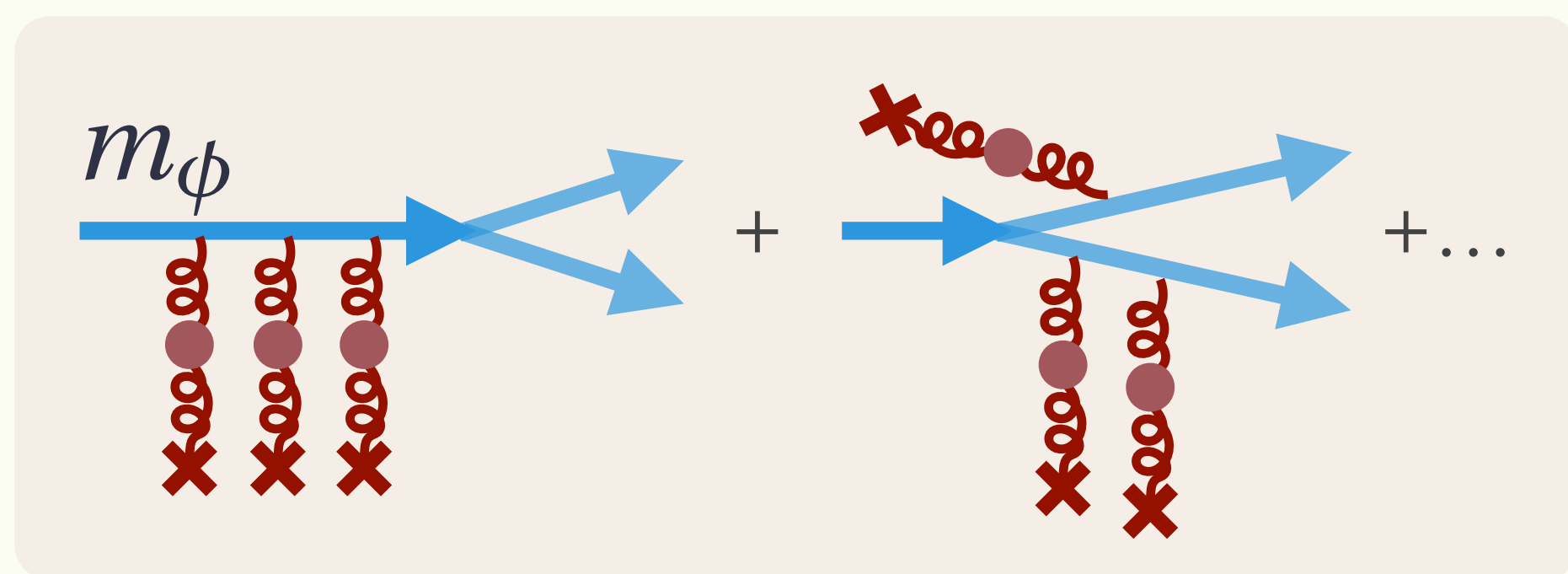
[Arnold, Moore, Yaffe '01,'02,'03;
 Arnold, Dogan '08]

長寿命インフラトンと希薄な熱プラズマ



- 宇宙時間で熱化する条件
 律速 $\rightarrow \Gamma_{\text{split}} > H \leftarrow$ 宇宙膨張率

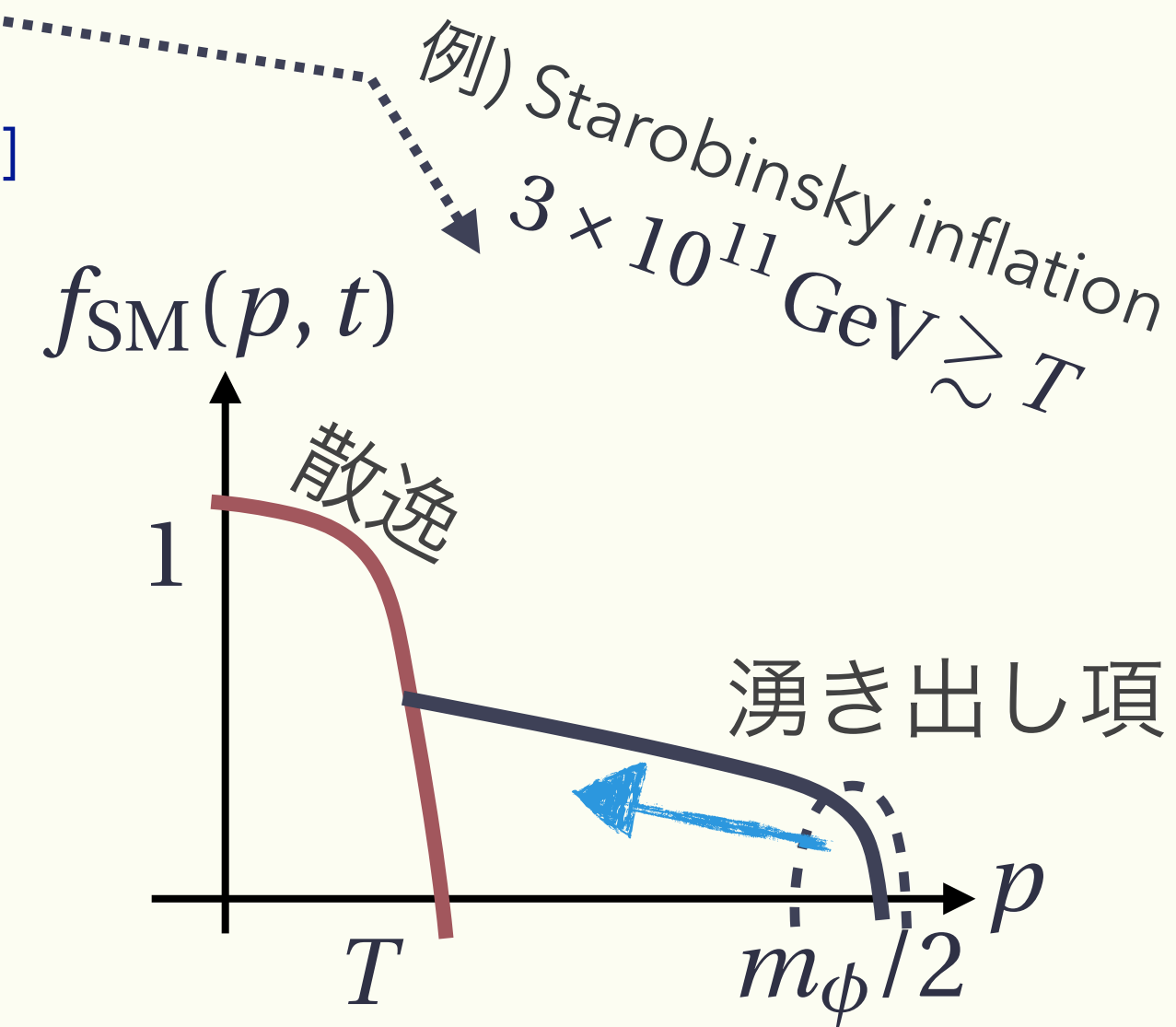
- Landau-Pomeranchuk-Migdal 効果 [Landau, Pomeranchuk; Migdal]



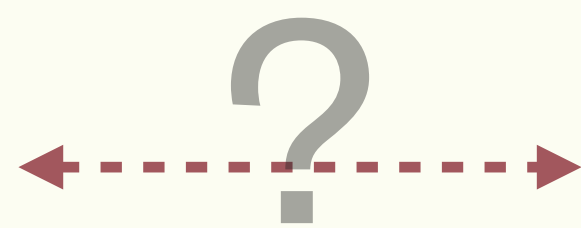
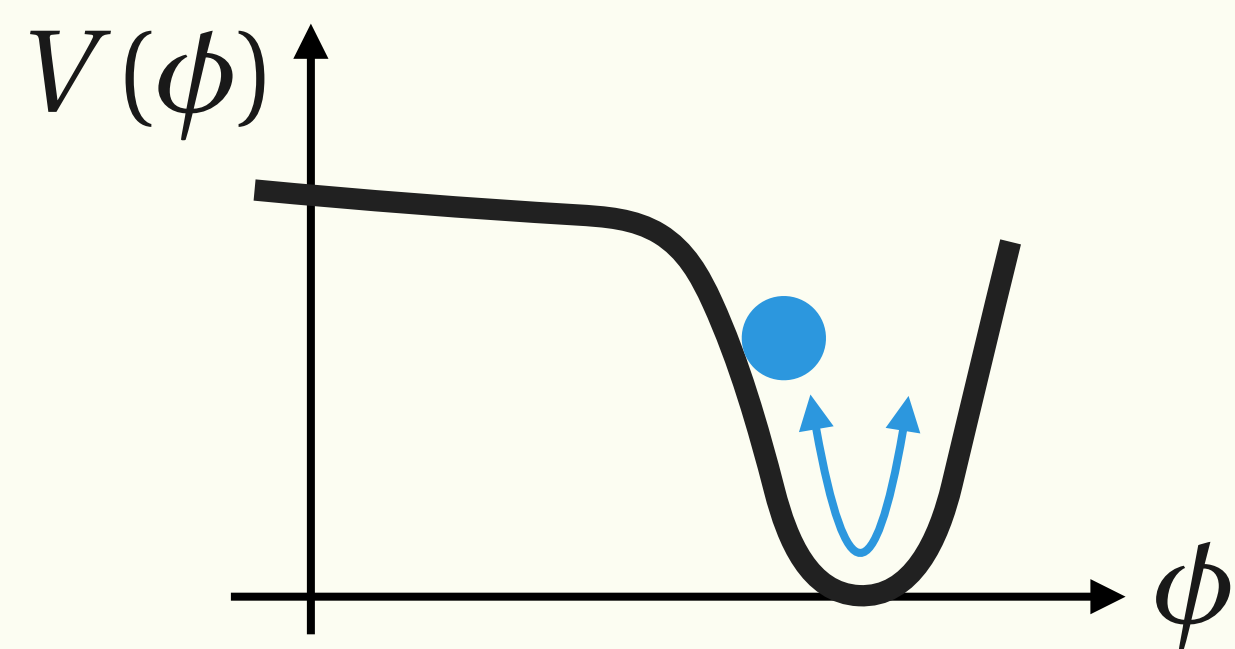
$$\Gamma_{\text{split}} \sim \alpha^2 T \times \sqrt{\frac{T}{m_\phi}}$$

Bethe-Heitler **LPM抑制**

[Arnold, Moore, Yaffe '01,'02,'03;
 Arnold, Dogan '08]



高エネルギー標準模型粒子のカスケード



Standard Model						
e_f	u_f	d_f				
L_f	Q_f		Φ	B_μ	W_μ	g_μ
レプトン	クォーク	ヒッグス	U(1)	SU(2)	SU(3)	

• LPM-suppressed splitting functions

$$\gamma_{s \rightarrow s' s''}(p; xp, (1-x)p) = \frac{1}{2} \frac{\alpha_{ss's''}}{(2\pi)^4 \sqrt{2}} \times \frac{P_{s \rightarrow s' s''}^{(\text{vac})}(x)}{x(1-x)} \times \mu_\perp^2(1, x, 1-x; s, s', s'')$$

$P_{s \rightarrow s' s''}^{(\text{vac})}(x)$: vacuum DGLAP splitting function

- 標準模型ゲージ相互作用 + top湯川相互作用

$\alpha_{s g_a s} = d_{R_s}^{(a)} C_{R_s}^{(a)} \alpha_a$

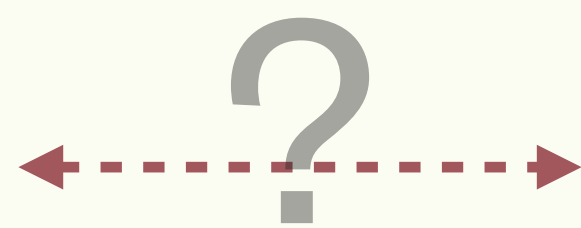
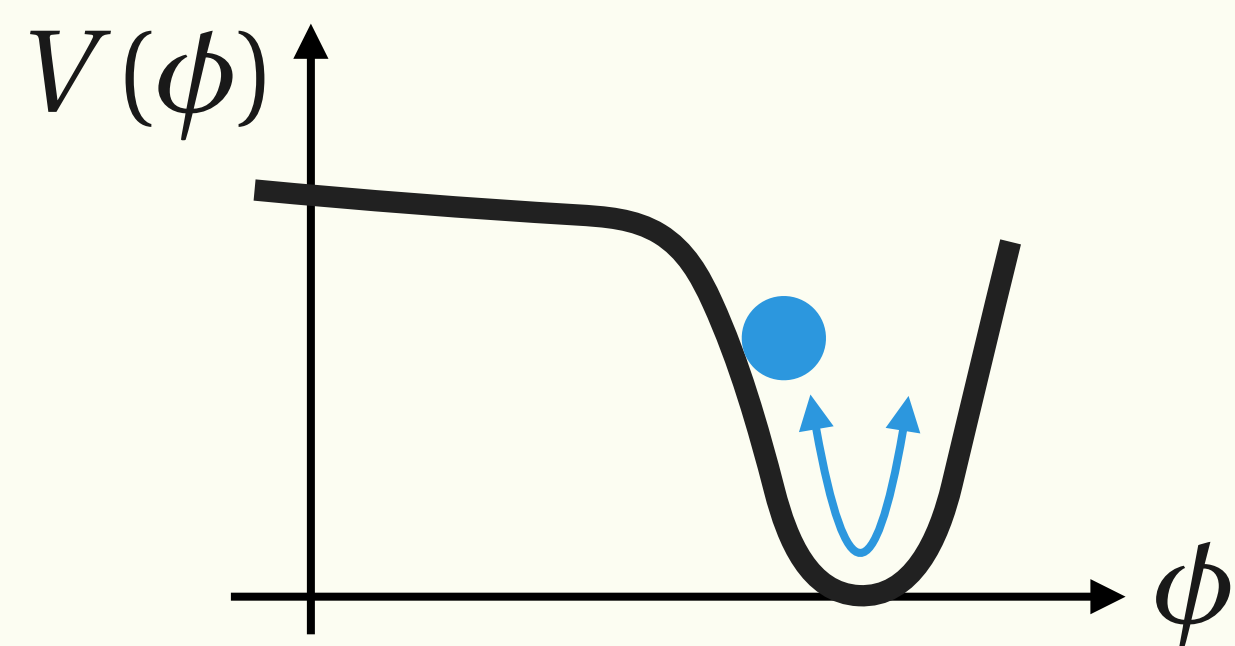
$\alpha_{u_3 \phi Q_3} = \alpha_t$

- 媒質中の干渉 → LPM効果

self-consistent eq.

↪ Leading Logは解析的に求まる.

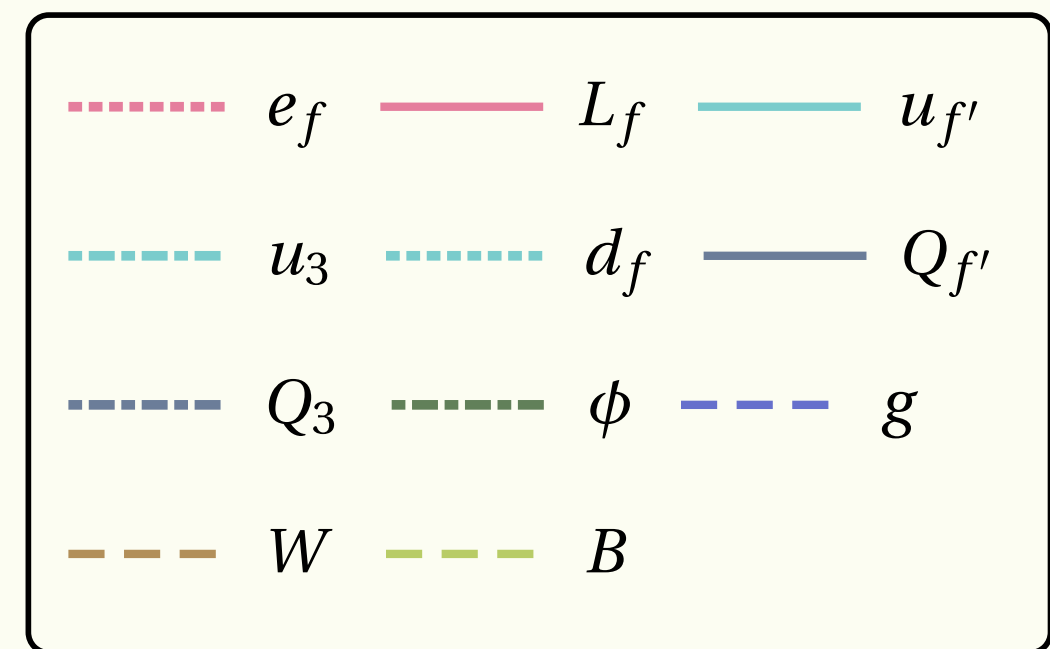
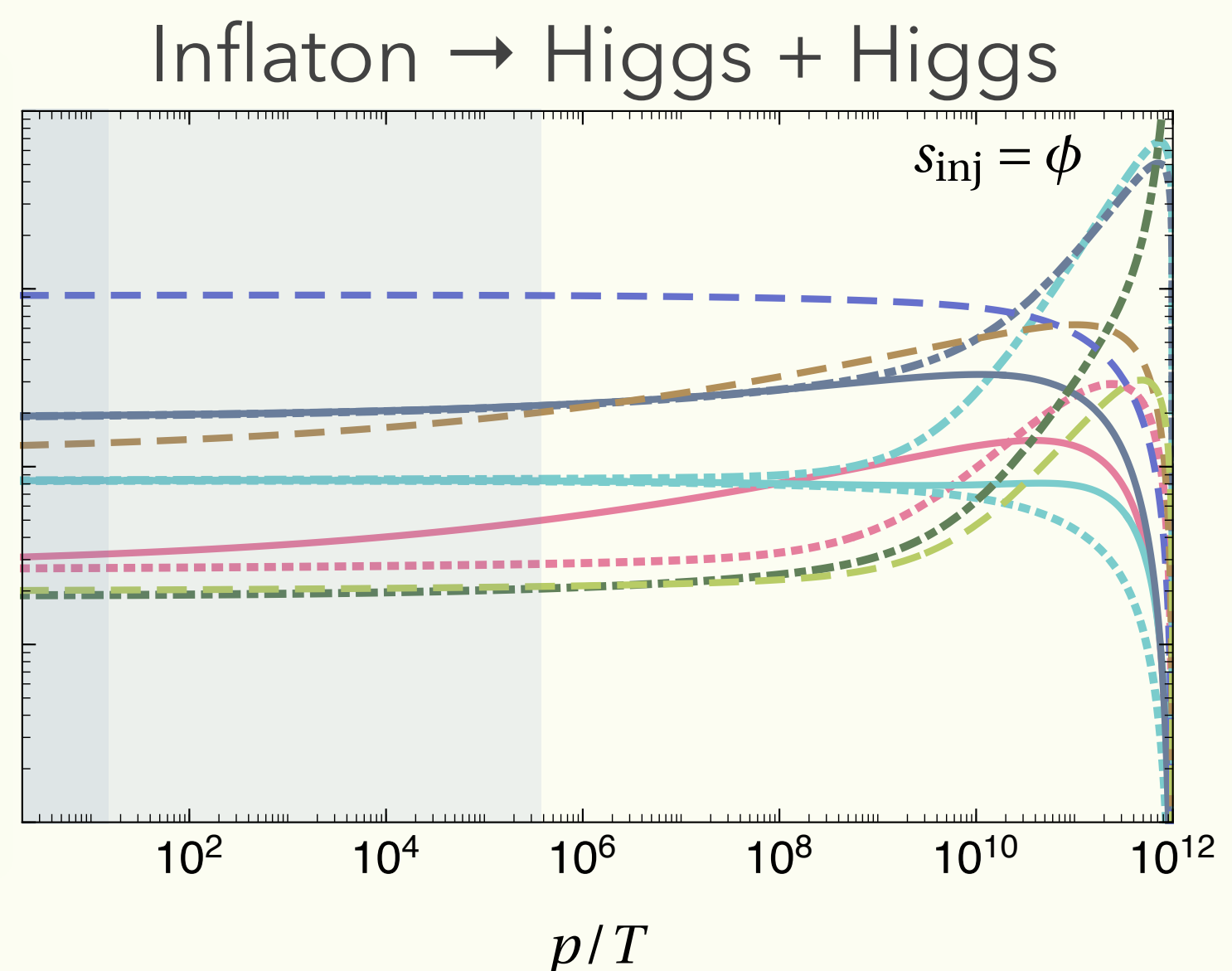
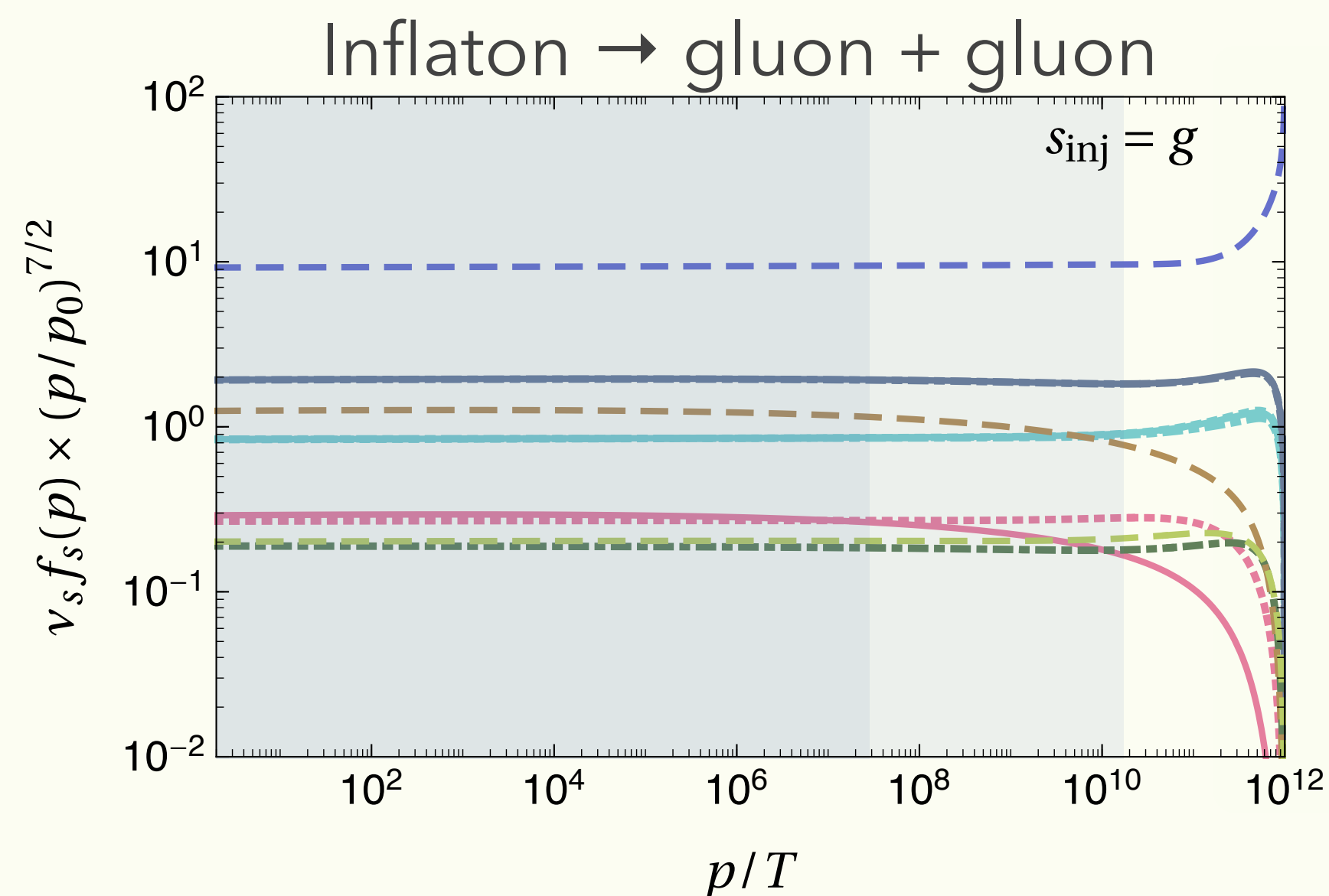
高エネルギー標準模型粒子のカスケード



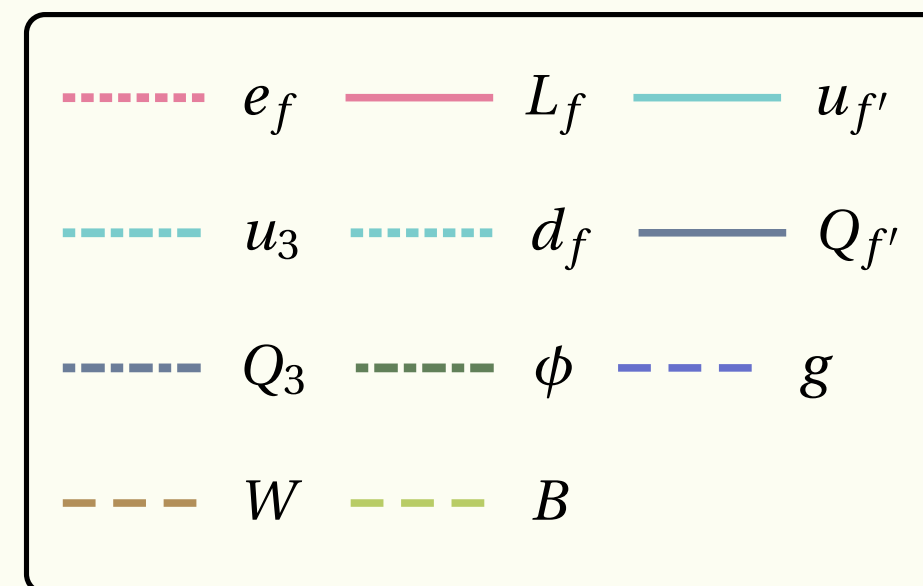
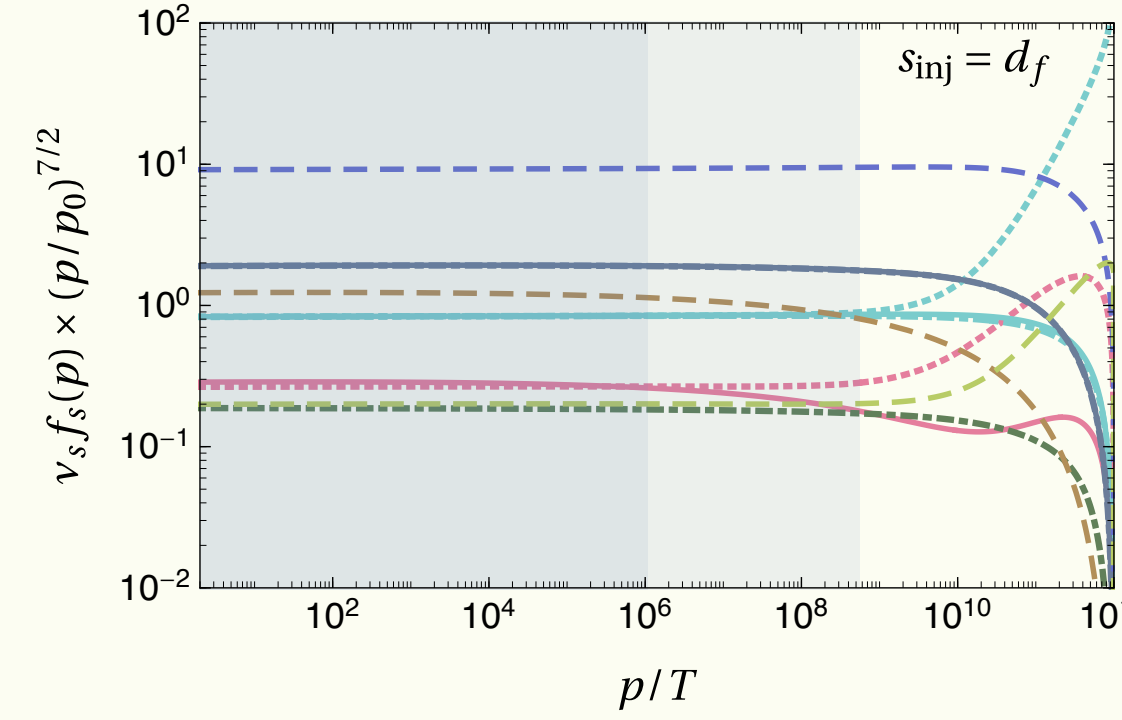
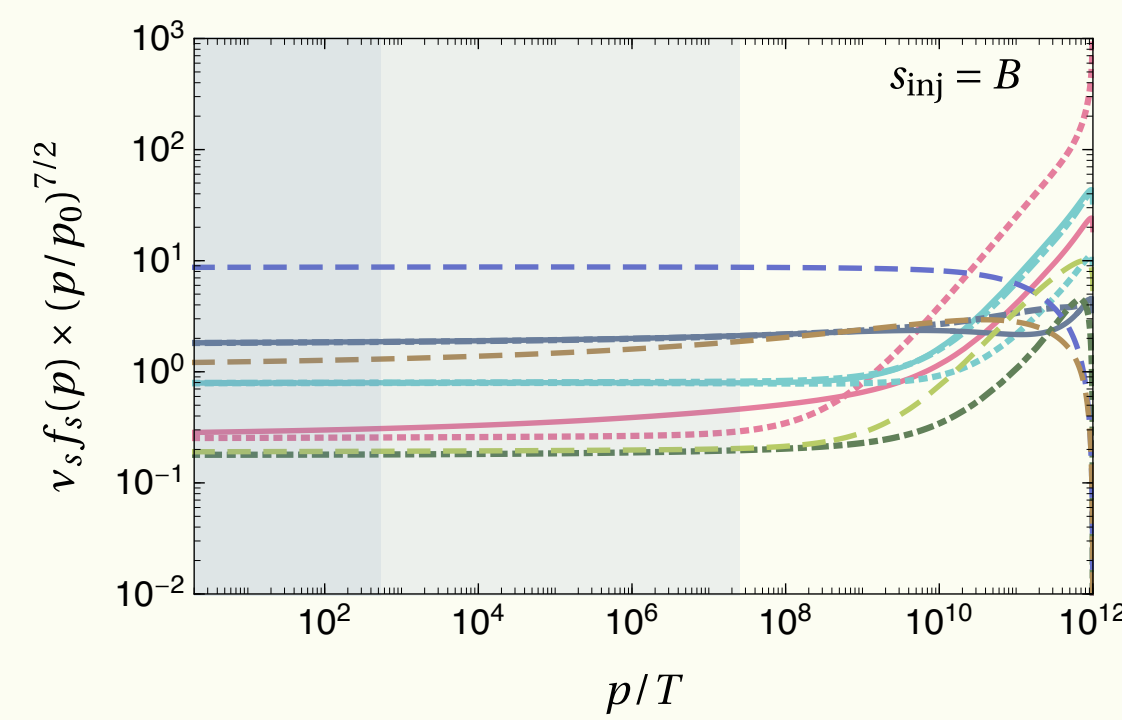
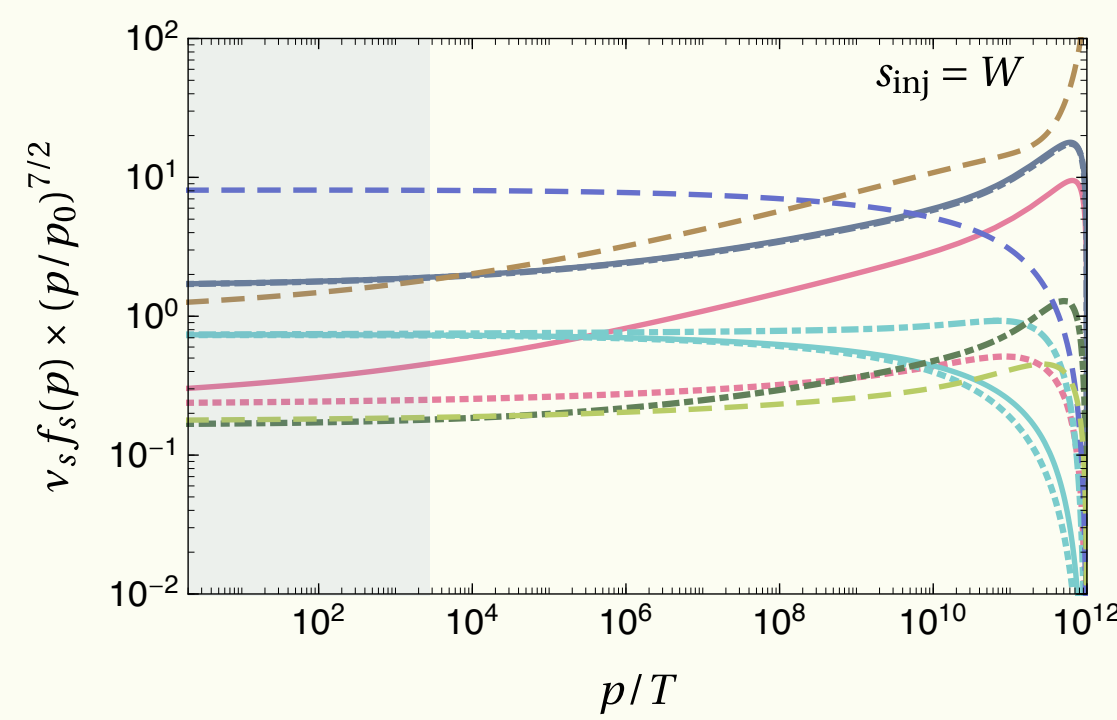
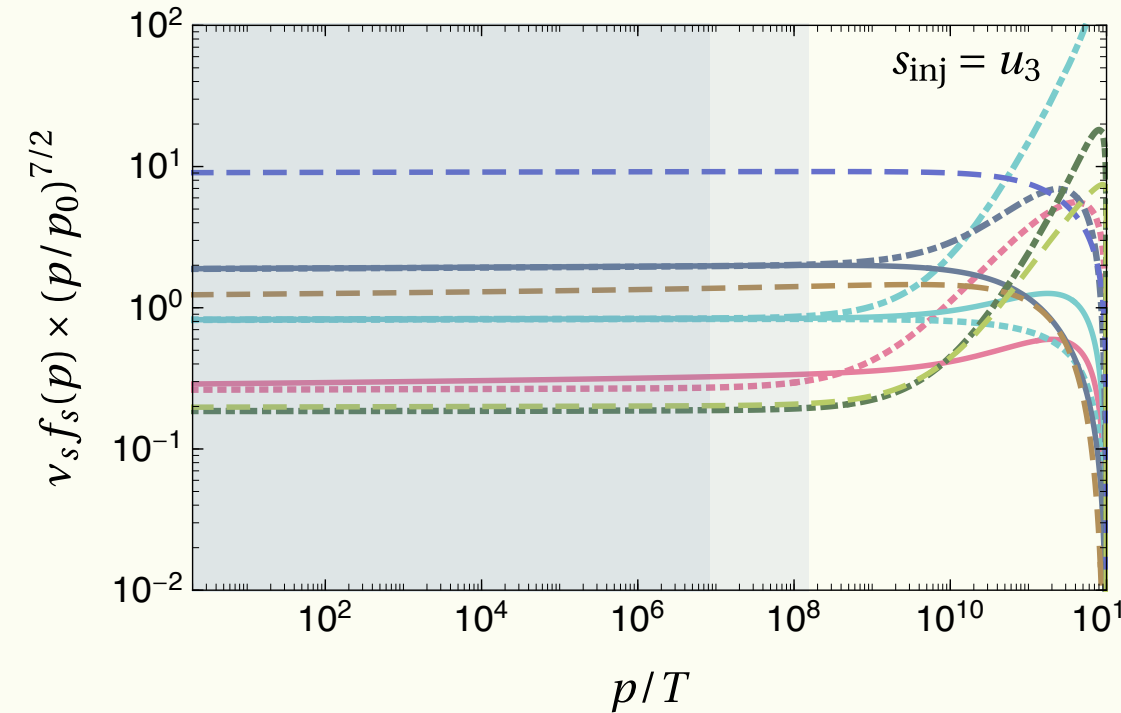
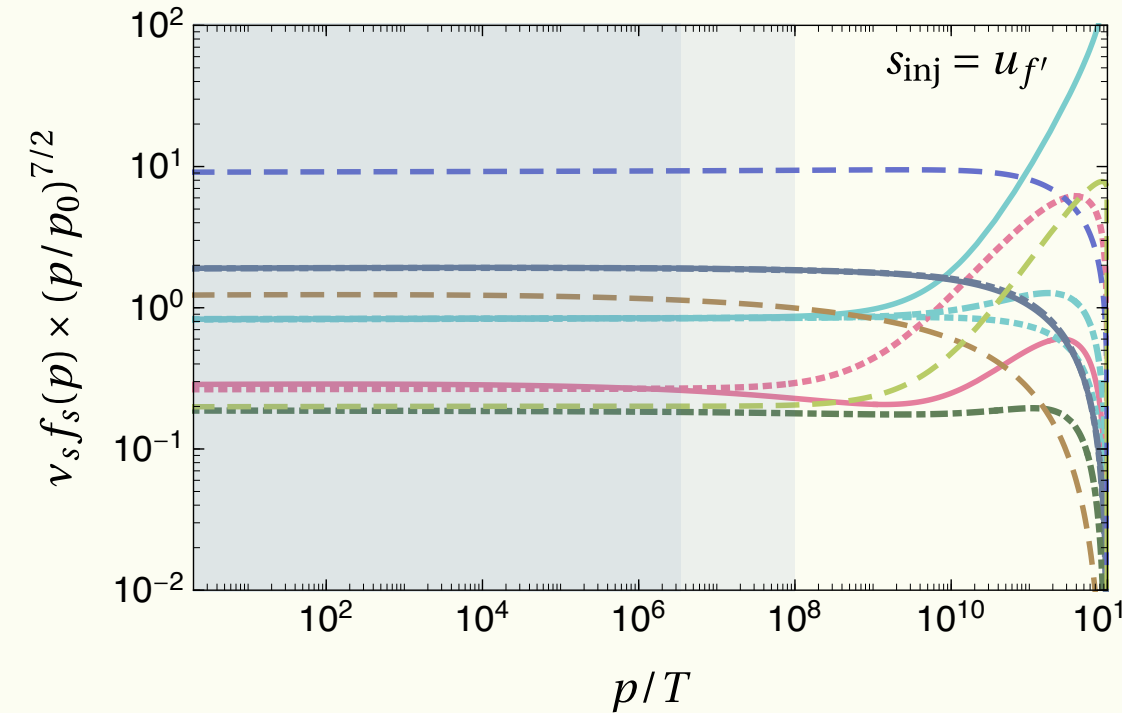
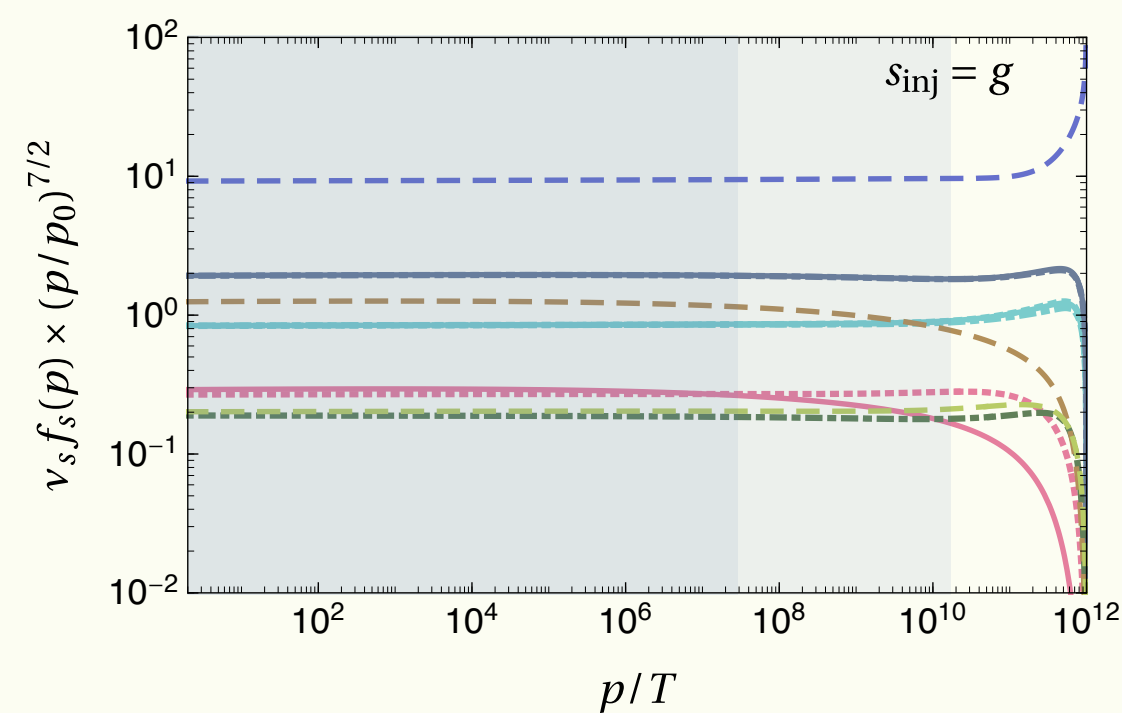
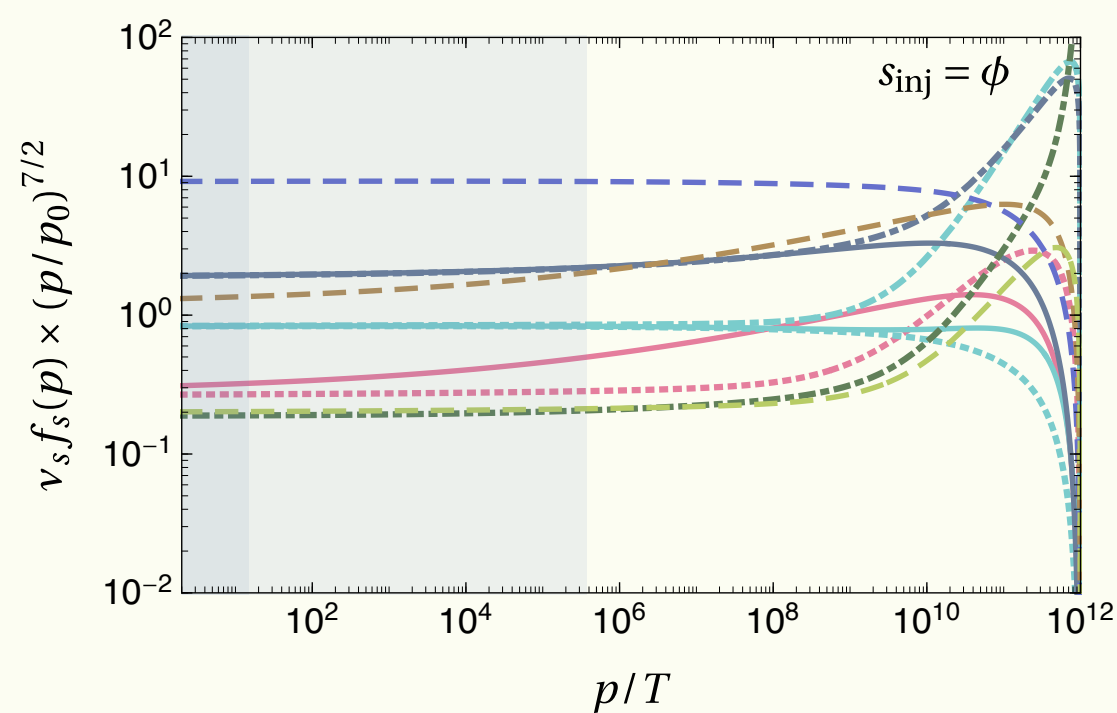
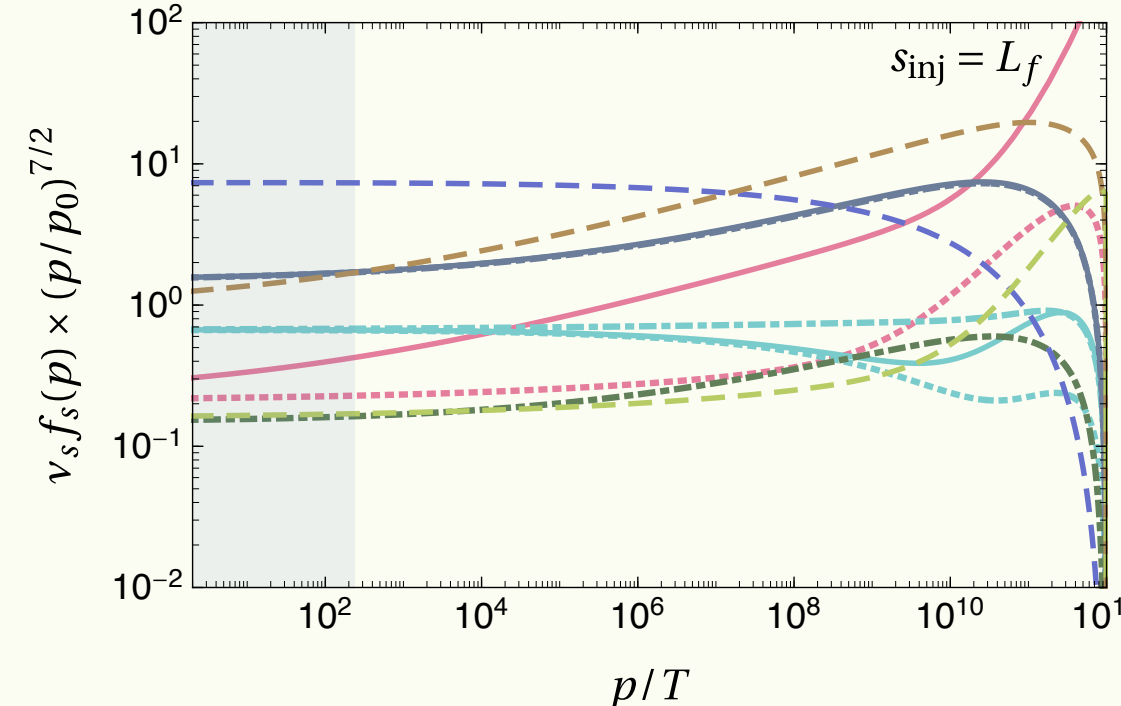
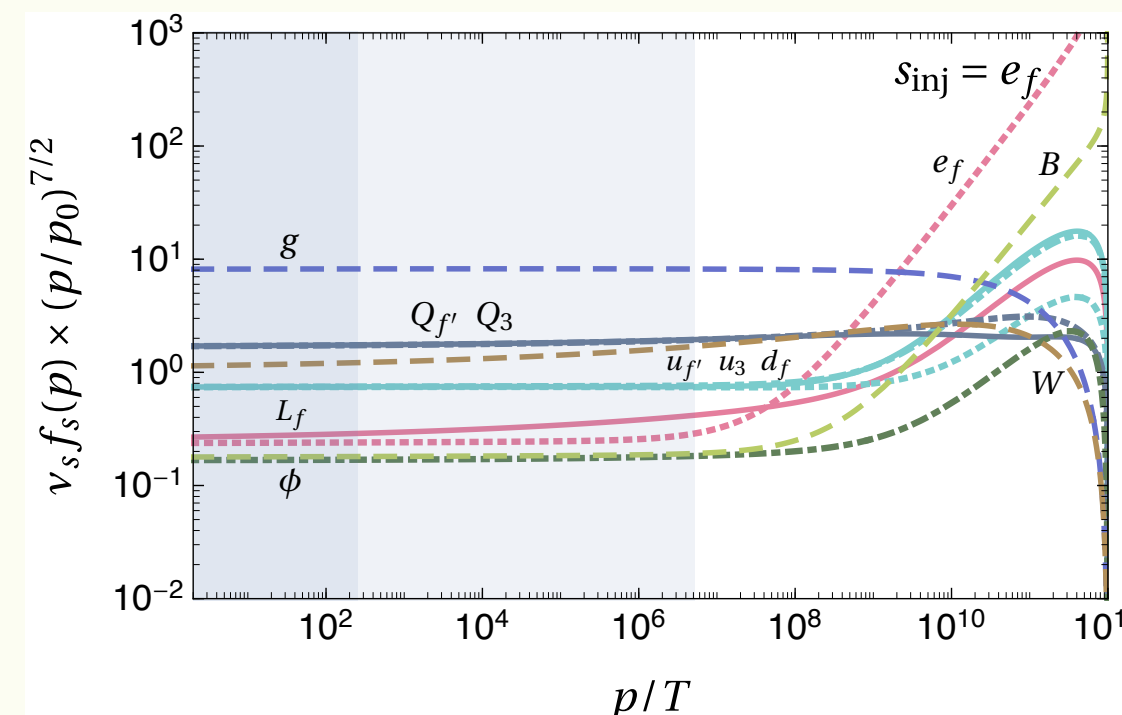
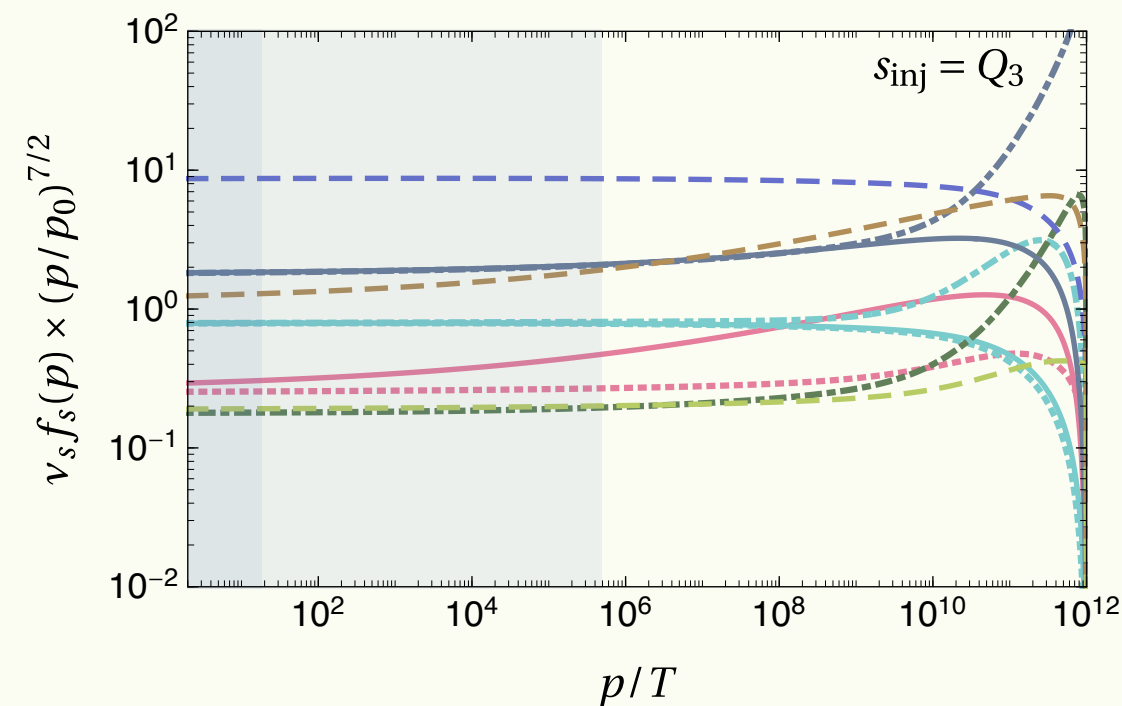
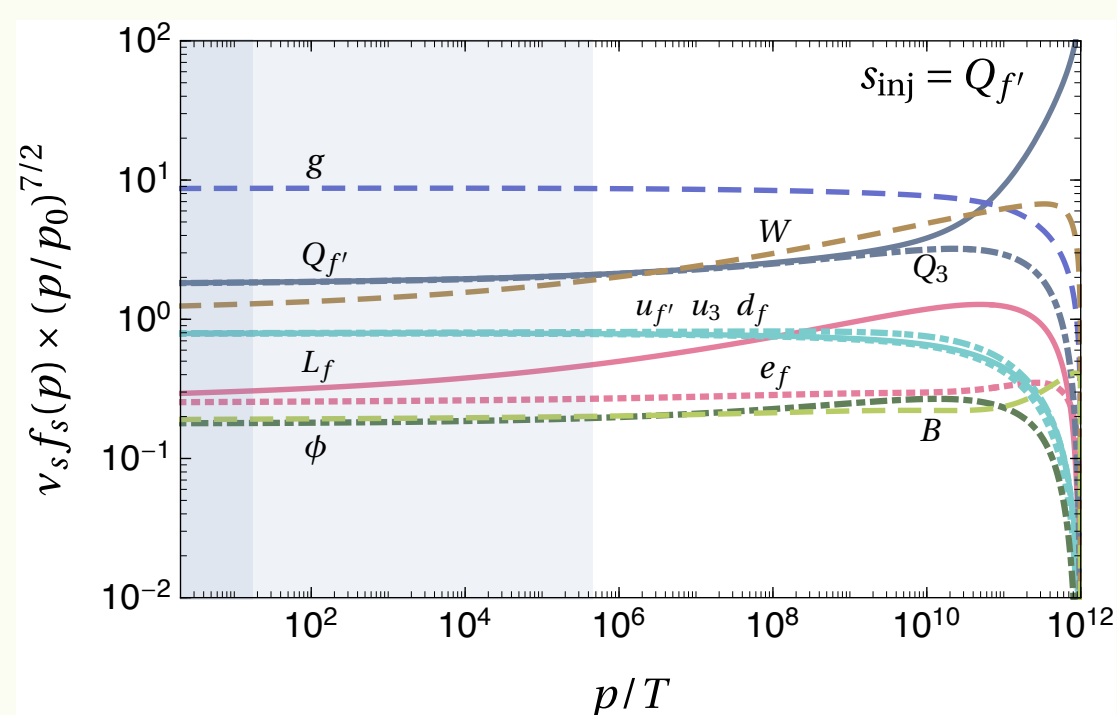
Standard Model

e_f	u_f	d_f				
L_f	Q_f		Φ	B_μ	W_μ	g_μ
レプトン	クォーク		ヒッグス	U(1)	SU(2)	SU(3)

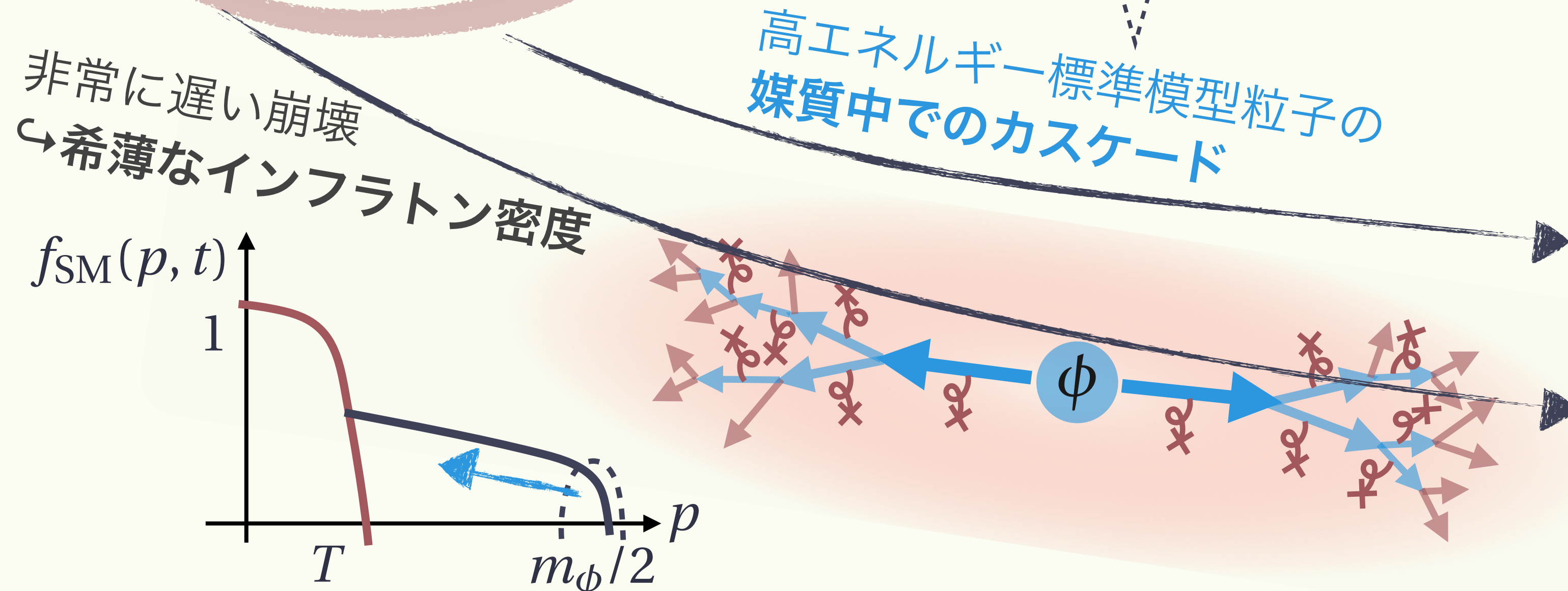
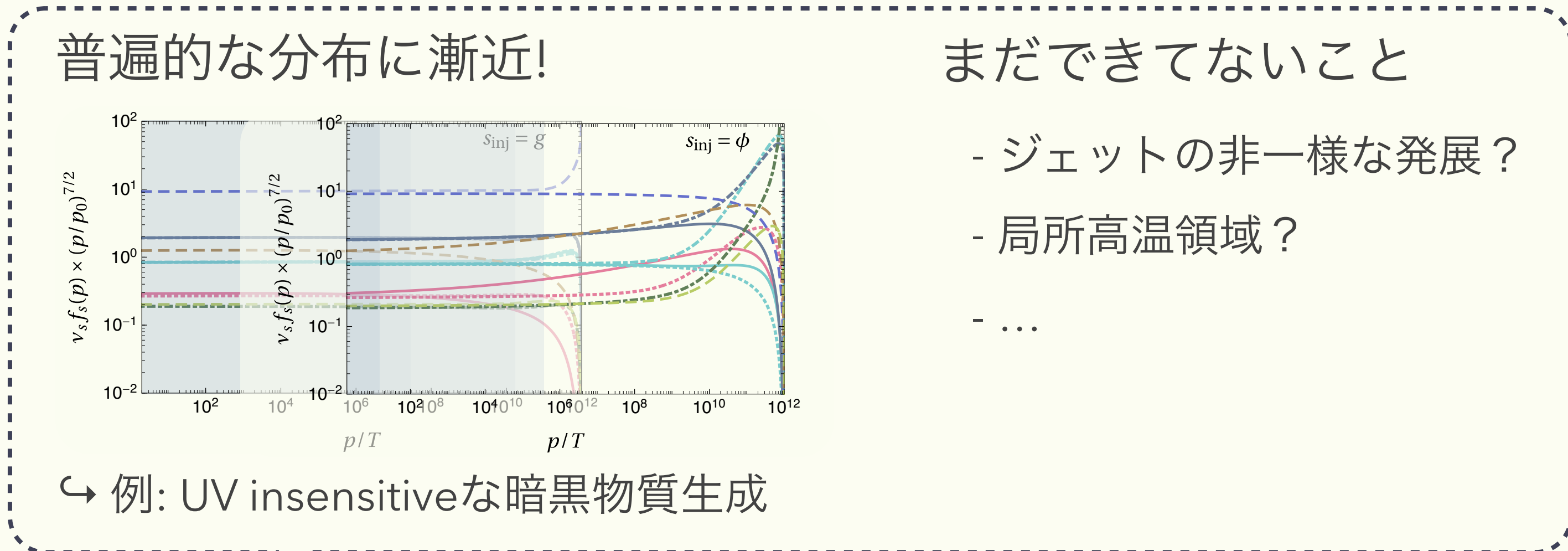
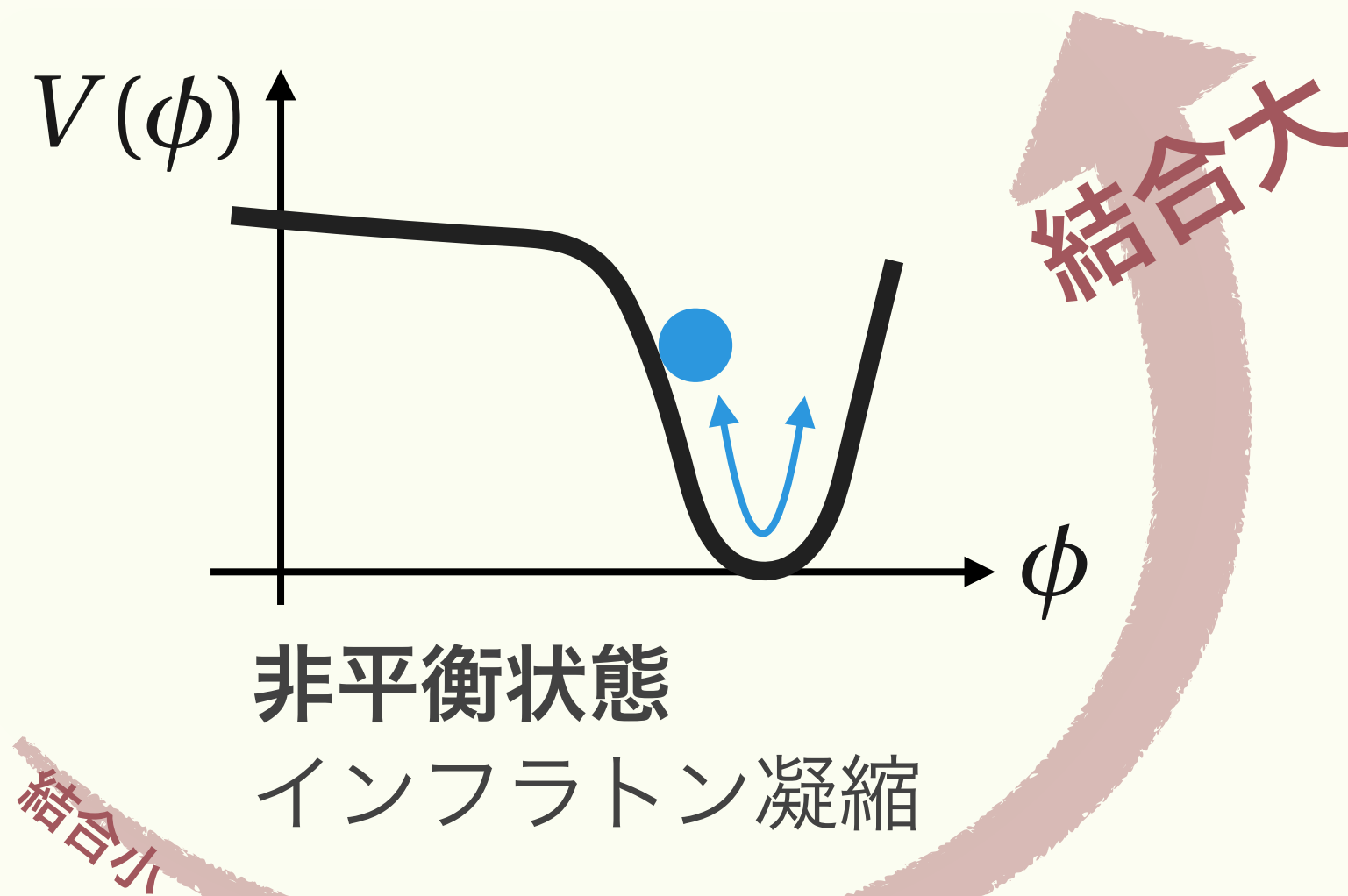
- 普遍的な分布に漸近 @ $p \ll$ インフラトン質量



普遍的な分布に漸近 @ $p \ll$ インフレーション質量



インフレーション後の再加熱・熱化



Standard Model
+ ...

熱プラズマ

Backup

More on in-medium cascades of high-energy SM particles

- **LPM-suppressed** splitting functions

$$\gamma_{s \rightarrow s' s''}(p; xp, (1-x)p) = \frac{1}{2} \frac{\alpha_{ss's''}}{(2\pi)^4 \sqrt{2}} \times \frac{P_{s \rightarrow s' s''}^{(\text{vac})}(x)}{x(1-x)} \times \mu_{\perp}^2(1, x, 1-x; s, s', s'') \quad P_{s \rightarrow s' s''}^{(\text{vac})}(x) : \text{vacuum DGLAP splitting function}$$

- 標準模型ゲージ相互作用 + top湯川相互作用

$$\alpha_{sg_a s} = d_{R_s}^{(a)} C_{R_s}^{(a)} \alpha_a \quad \alpha_{u_3 \phi Q_3} = \alpha_t$$

	e_f	L_f	u_f	d_f	Q_f	Φ	g	W	B
SU(3)			F	F	F		A		
SU(2)		F			F	F		A	
U(1)	-1	-1/2	2/3	-1/3	1/6	1/2			

	C_F	C_A	d_F	d_A	t_F	t_A
SU(3)	4/3	3	3	8	1/2	3
SU(2)	3/4	2	2	3	1/2	2
U(1)	q_Y^2	0	1	1	q_Y^2	0

- 媒質中の干渉 → LPM効果

self-consistent eq.

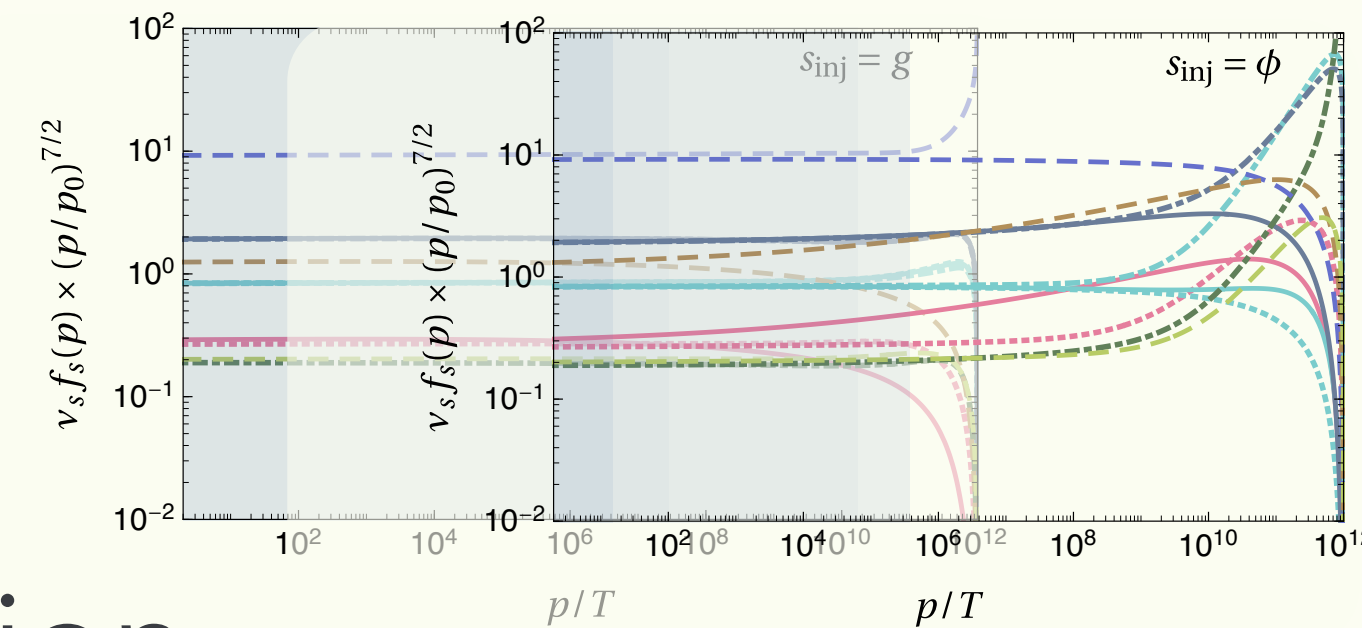
↪ Leading Logは解析的に求まる.

$$\mu_{\perp}^4(x_1, x_2, x_3; s_1, s_2, s_3) = \frac{2}{\pi} x_1 x_2 x_3 p \sum_a \frac{\alpha_a(m_{D,a}) - \alpha_a(Q_{\perp,a})}{-b_a / (64\pi^3)} \mathcal{N}_a \times \sum_{\sigma \in A_3} \frac{1}{2} \left[C_{R_{s_{\sigma(2)}}}^{(a)} + C_{R_{s_{\sigma(3)}}}^{(a)} - C_{R_{s_{\sigma(1)}}}^{(a)} \right] x_{\sigma(1)}^2$$

$$b_a = \begin{cases} -7 \\ -\frac{19}{6} \\ \frac{41}{6} \end{cases} \quad \mathcal{N}_a = \begin{cases} 15 \frac{\zeta(3)}{\pi^2} T^3 \\ 14 \frac{\zeta(3)}{\pi^2} T^3 \\ 6 \frac{\zeta(3)}{\pi^2} T^3 \end{cases} \quad m_{D,a}^2 = \begin{cases} 8\pi\alpha_3 T^2 & \text{for SU(3)} \\ \frac{22\pi}{3} \alpha_2 T^2 & \text{for SU(2)} \\ \frac{22\pi}{3} \alpha_1 T^2 & \text{for U(1)} \end{cases}$$

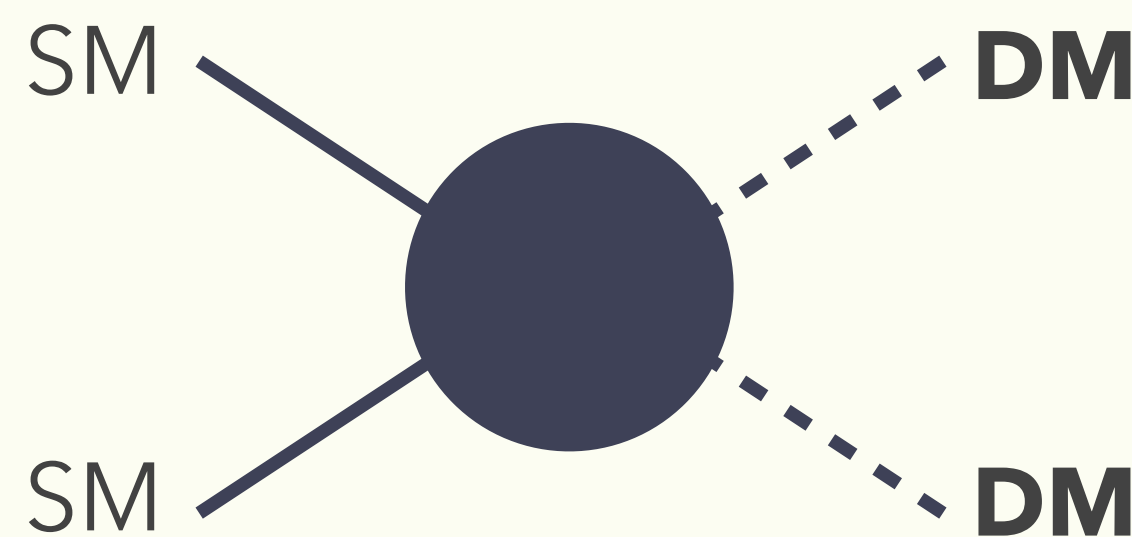
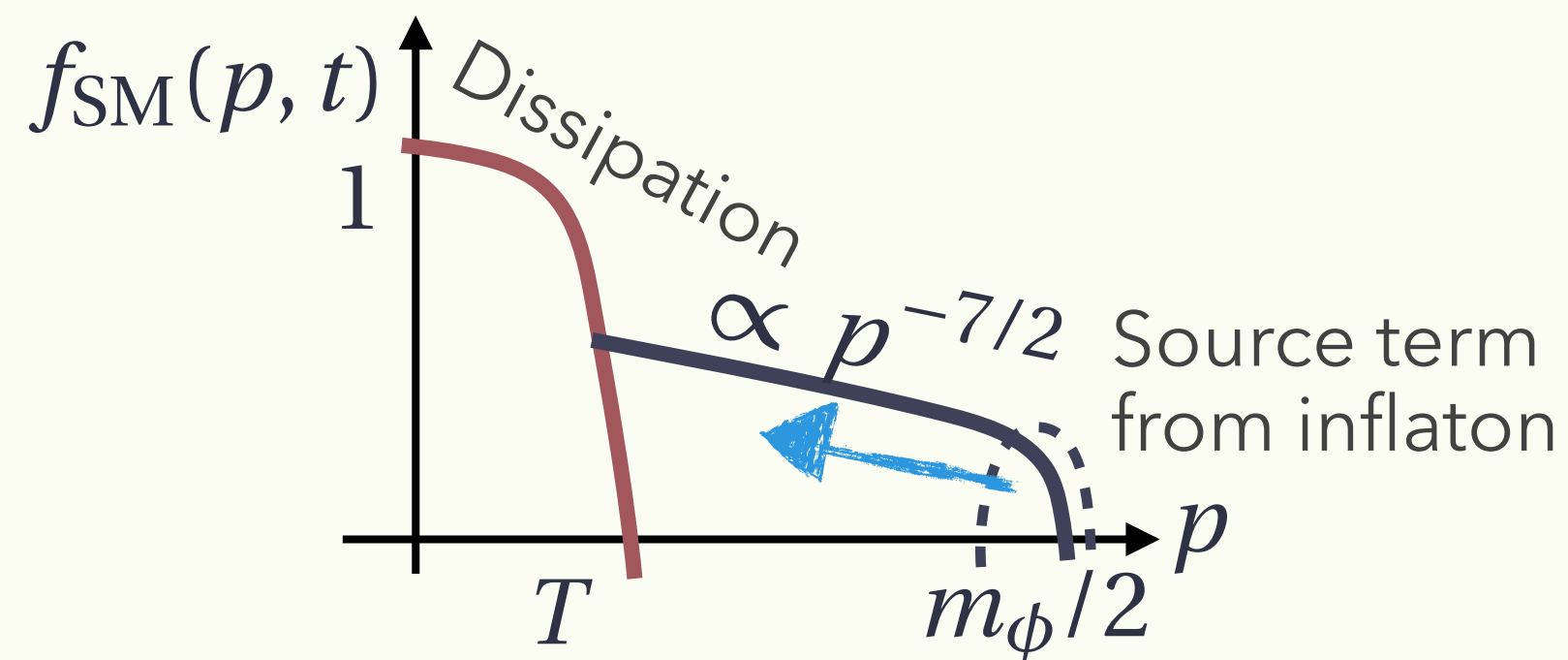
Implications of cascading high-energy tail

- **Universality** for $p \ll$ Inflaton mass



- **UV-insensitive** Dark Matter production

[KM+ 1402.2846, 1901.11027]



Independent of Inflaton decay

$$\frac{\rho_{\text{DM}}}{s} \simeq 0.33 \alpha_{\text{DM}}^2 \frac{T_{\text{R}}^3}{m_{\text{DM}}^2}$$

[KM, Yamada 2208.11708]

- Baryogenesis: e.g., via reactivating sphaleron @ $T < 10^2$ GeV

- Requires **inhomogeneous** studies... [Shaposhnikov+ 0310100; Jaeckel, Yin 2206.06376]