

Qボールから放出される重力波と その観測可能性



2010年12月21日 @ 第23回理論懇シンポジウム

鎌田 耕平(東京大学ビッグバンセンターD3)

based on : T. Chiba, KK, M. Yamaguchi, Phys.Rev.D81:083503,2010

T. Chiba, KK, S. Kasuya, M. Yamaguchi, Phys. Rev. D82:103534,2010

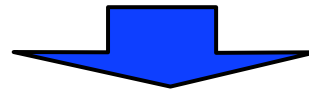
Introduction

物質反物質非対称

There are MANY models of baryogenesis!!

GUT baryogenesis
Leptogenesis
Electroweak baryogenesis
Affleck-Dine baryogenesis and so on...

→ 数あるmodelのうちどれが実際起こったものなのかidentify
できるような観測的証拠が(少)ない。(原理的にも)

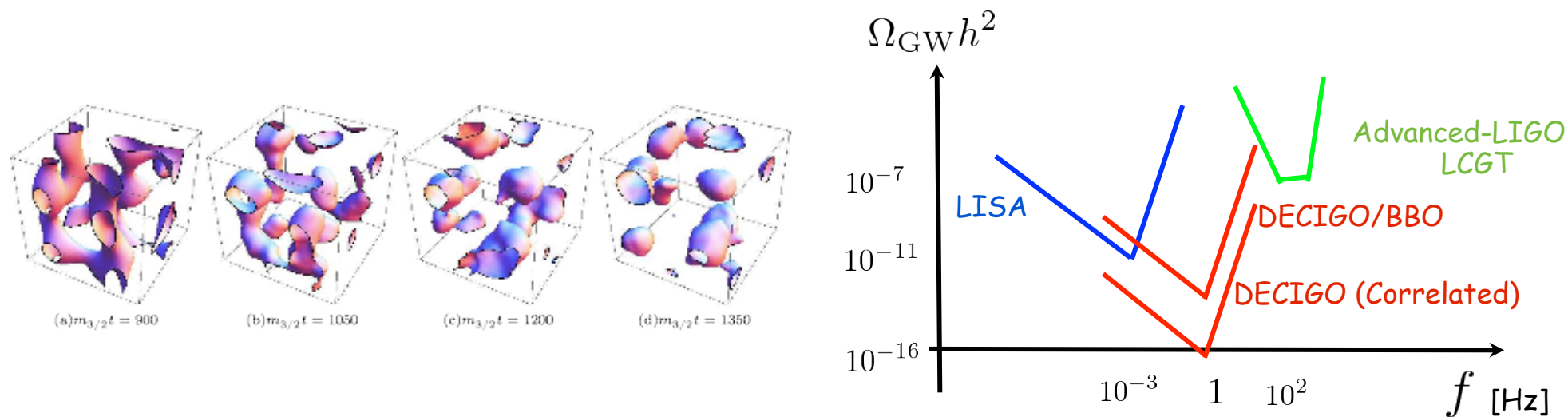


もしbaryogenesisの証拠を観測することが
できればそのimpactは計り知れない。

→ Affleck-Dine 機構に注目

Gravitational waves from Q-ball formation?

有力なBaryogenesisのmodelのひとつである、**Affleck-Dine mechanism** に付随して起こる**Q-ball formation**時に**大きな重力波**が生成され、それが検出可能かもしれない。('08, '09 Kusenko et al.)



そのような重力波が観測・同定されたとき、
宇宙論、素粒子論に対して何が言えるか？

Affleck-Dine mechanism

Baryogenesis from the condensation of SUSY scalar fields
(I. Affleck&M. Dine('85), M. Dine, L. Randall&S. Thomas ('96))

squark,slepton(scalar partner of quark/lepton)

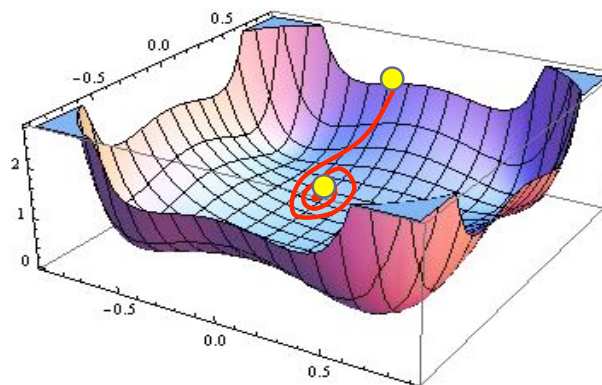
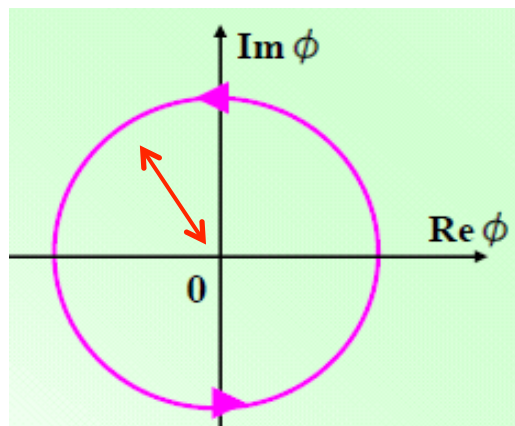


バリオン/レプトン数を持った複素スカラー場

⇒(複素スカラー場の内部空間での回転)

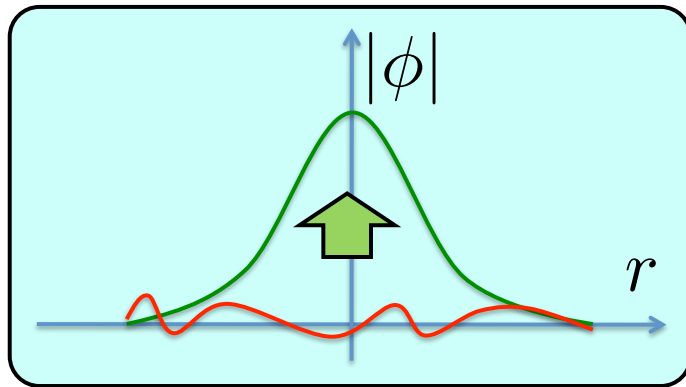
=(バリオン(レプトン)数密度)

$$n_B(t) = iq_B(\dot{\phi}^* \phi - \phi^* \dot{\phi}) = 2|\phi|^2 \dot{\theta}$$



Q-ball formation

… 二次より平らなポテンシャルの下では、一様モードの周りの揺らぎは不安定で、指数関数的に成長する。



$$\delta\phi_0 \rightarrow \delta\phi(t) = \delta\phi_0 e^{\beta_{\text{gr}} t}$$
$$\left(\beta_{\text{gr}} \lesssim \frac{k_{\text{max}}}{a} \simeq V'' \right)$$

⇒ 大域的 U(1) 対称性

→ 安定な球状の場の配位

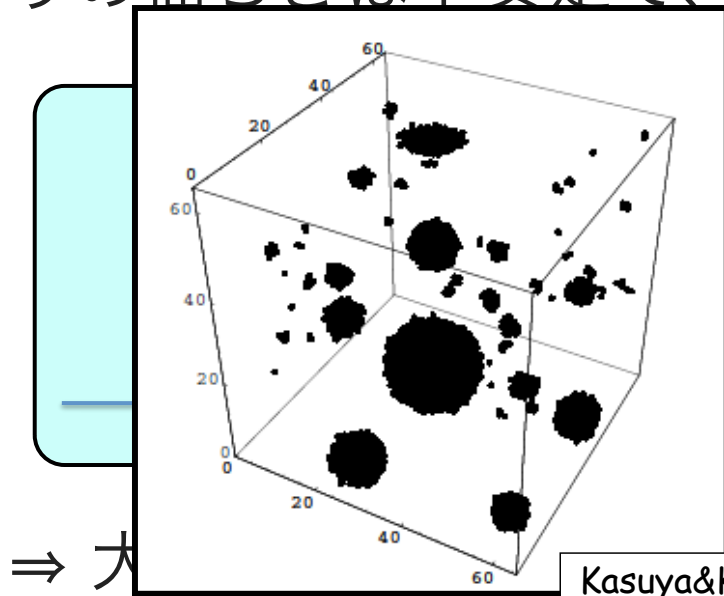
➡ **Q-ball solution**
(‘85 Coleman)

☑ $H \simeq \beta_{\text{gr}} \simeq V''$: 振動開始直後に Q ball が形成する

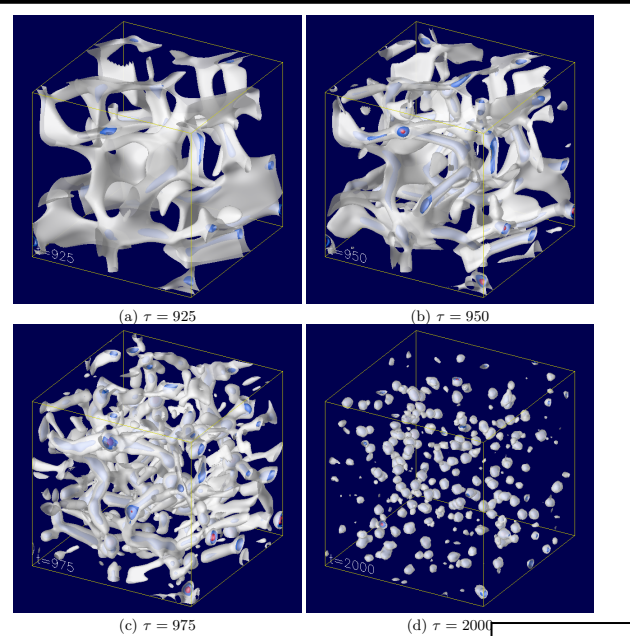
☑ baryon/lepton 数はほぼ Q ball の中に閉じ込められる

Q-ball formation

… 二次より平らなポテンシャルの下では、一様モードの周りの揺らぎは不安定で、指数関数的に成長する



$$\delta\phi_0$$



t

⇒ 大

Kasuya&Kawasaki('00)

→ 安定な球状の場の配位

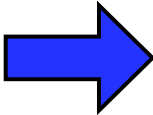
Q-ball solution
Hiramatsu+ ('10)
(85 Coleman)

- ☑ $H \simeq \beta_{gr} \simeq V''$: 振動開始直後に Q ball が形成する
- ☑ baryon/lepton 数はほぼ Q ball の中に閉じ込められる

GWs from Q-ball formation

重力波のEquation of motion :

$$\ddot{h}_{ij}^{\text{TT}}(x, t) + 3H\dot{h}_{ij}^{\text{TT}}(x, t) - \frac{\nabla^2}{a^2}h_{ij}^{\text{TT}}(x, t) = 16\pi G\Pi_{ij}^{\text{TT}}(x, t)$$

 $h_{ij}^{\text{TT}} \simeq -\frac{1}{6M_G^2}\delta\phi^2$

$$\Pi_{ij}^{\text{TT}} \simeq \frac{1}{a^2}\partial_i\delta\phi\partial_j\delta\phi$$

Q-ball生成完了直前には

$$\rho_{\text{GW}} \simeq \frac{M_G^2}{4}\dot{h}_{ij}^{\text{TT}}\dot{h}_{ij}^{\text{TT}} \rightarrow \frac{\beta_{\text{gr}}^2\phi_Q^4}{9M_G^2}$$
$$\Omega_{\text{GW}} \simeq \frac{\beta_{\text{gr}}^2\phi_Q^4}{27M_G^4 H_*^2} \quad f \simeq \frac{k_{\text{max}}}{\pi a}$$

$\phi_Q \simeq M_G$ でかなり大きな重力波が生成される

(\Rightarrow その後は輻射のように減衰する。)

※ただしここでバリオン数は考慮していない

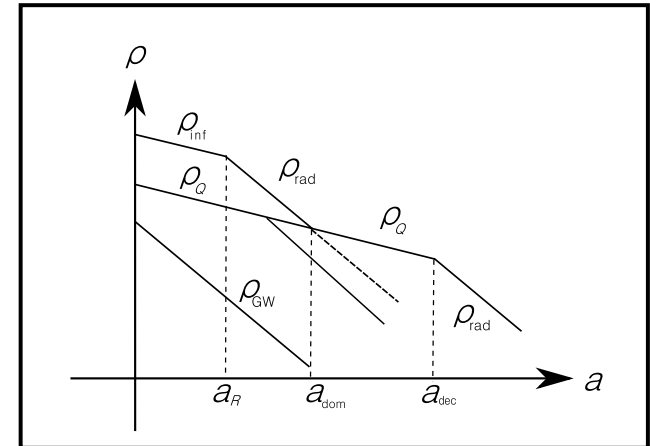
/ 重力波が観測できるようなパラメータが見つかった場合にバリオン数とのconsistencyを考える。

重力波の検出可能性

重力波の現在のamplitudeと周波数：

$$\Omega_{\text{GW}}^0 \simeq \begin{cases} \left(\frac{H_*}{H_R}\right)^{-2/3} \left(\frac{H_{\text{dom}}}{H_{\text{dec}}}\right)^{-2/3} \Omega_{\text{GW}}^* \frac{a_{\text{eq}}}{a_0} & \text{with Q - dom} \\ \left(\frac{H_*}{H_R}\right)^{-2/3} \Omega_{\text{GW}}^* \frac{a_{\text{eq}}}{a_0} & \text{without Q - dom,} \end{cases}$$

$$f_0 \simeq \begin{cases} \frac{T_0}{T_R} \left(\frac{H_{\text{dec}}}{H_{\text{dom}}}\right)^{1/6} \left(\frac{H_R}{H_*}\right)^{2/3} f_* & \text{with Q - dom} \\ \frac{T_0}{T_R} \left(\frac{H_R}{H_*}\right)^{2/3} f_* & \text{without Q - dom.} \end{cases}$$



- 放出された直後の重力波のamplitudeと周波数
 - Q ballがいつdecayするか (Q-ball dominant期があるとその分diluteされる)
- によって決まる

大きなamplitudeの重力波を出すQ ballほど宇宙をdominateしやすい

Various Q balls

Q ballはscalar場 (AD)場の運動を引き起こす
ポテンシャルの形によって違う性質を持つ



ゼロ温度ポテンシャル

- ✓ gravity-mediation type
- ✓ gauge-mediation type
- ✓ new type
- ✓ delayed type

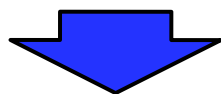
温度ポテンシャル

- ✓ thermal-log type
- ✓ negative thermal-log type

ゼロ温度ポテンシャルの場合

- ✓ gravity-mediation type
- ✓ gauge-mediation type
- ✓ negative thermal-log type
- ✓ new type
- ✓ delayed type

radiation dominated eraにmatterとして振る舞うため、
宇宙をdominateしやすい。
⇒大きなinitial GWにQ-ball dominated eraは不可避



重力波はamplitudeが足りず、観測不可能

$$\Omega_{\text{GW}}^0 < 10^{-21}$$

温度ポテンシャルの場合

Q ballのエネルギーに温度依存性

⇒radiationと同じくらい早くエネルギー密度が落ちる

⇒宇宙のエネルギー密度を支配しにくい

※最終的にはゼロ温度ポテンシャルが勝つ

->それに応じたQ ballに。

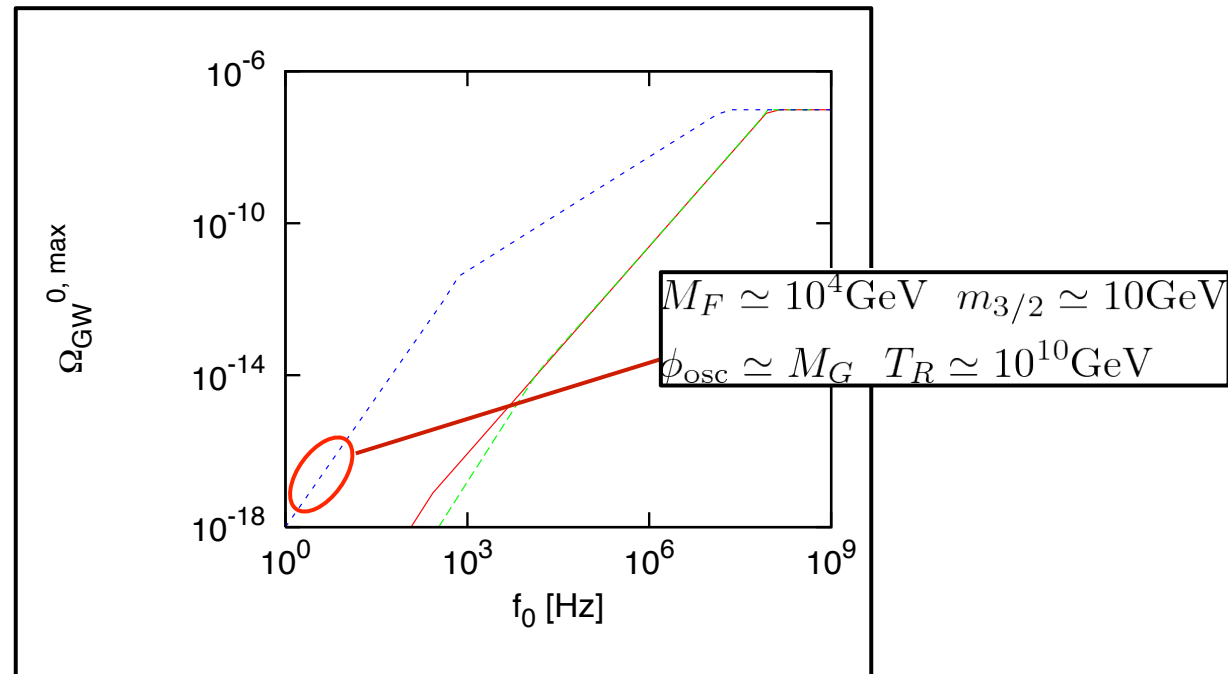
$$\text{最大 } \Omega_{\text{GW}} \simeq 10^{-8}$$

が、周波数を合わせるのは少し難しい。。

温度ポテンシャルの場合

Gauge mediationの場合：

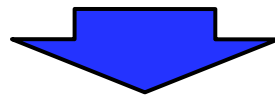
- Thermal → gauge
- Thermal → gravity
- Thermal → gravity
→ gauge



Implications

Present baryon asymmetry

: Q-ball dominated eraでのQ-ball decayによって供給
⇒ present radiation (entropy)もQ-ball decayによって供給
⇒ too large baryon asymmetry



cosmologicalに問題のないシナリオ：

- ◆ baryon/lepton数を打ち消すようにスカラー場を選ぶ
(baryon asymmetryは諦める)
- ◆ なにか対称性を課してCPの破れをsuppressする

つまり、自然にバリオン非対称を説明出来るパラメータでは
重力波は観測できない。

Summary and Conclusion



- ✓ Q ball由来の重力波はもし将来計画で観測できれば強力な**baryogenesis**の**証拠**になりうる。
- ✓ 観測できるparameter regionを探し、宇宙論、素粒子論へのimplicationを与えた。
- ✓ parameter regionは非常に狭く、特に**ゼロ温度ポテンシャル**でQ ballが作られる場合は重力波観測は将来計画でも難しいことがわかった。
- ✓ **温度ポテンシャル**によってQ ballが作られる場合もbaryogenesisを自然に説明できる領域では重力波を観測することはほぼ不可能。
- ✓ **何らかの対称性などでbaryon非対称を微調整する場合**にのみ、Q ball由来の重力波を観測することができるかもしれないparameter regionが存在する。

Appendix

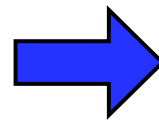
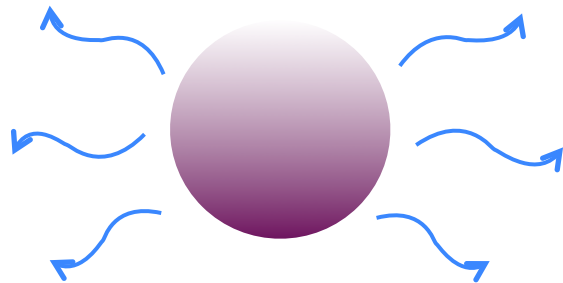
Q-ball decay

'85 Cohen et al

Q-ballは**表面**からしかdecayできない。

- ▶ AD場と直接coupleする場合はQ-ball内部で非常に重い
- ▶ fermionへのQ-ball内部での崩壊はそもそもfermi統計で禁じられる

➡ **表面**からのdecay productのfluxは上限があり、それでQ-ball decay rateが決まる。



$$\Gamma_{\text{dec}} = \frac{\omega^3 R^2}{48\pi Q}$$