

アクション宇宙物理

神戸大学大学院理学研究科早田研究室
2014年11月26日-28日

小玉 英雄

KEK 素粒子原子核研究所
理論センター
理論宇宙物理グループ

Copyright Hideo Kodama 2014.11.26

目次

第 1 章 Introduction	1
1.1 What is axion?	1
1.1.1 Axion and ALP	1
1.2 アクシオンの引き起こす多様な宇宙現象	3
1.2.1 特徴的な質量スケール	3
1.2.2 微小質量アクシオンの引き起こす多様な現象	3
第 2 章 QCD axion	5
2.1 QCD におけるカイラル対称性の破れ	5
2.1.1 QCD の Chiral 対称性	5
2.1.2 対称性の自発的破れ	7
2.1.3 Goldberger-Treiman 関係式	9
2.1.4 近似的対称性の自発的破れと擬 Goldstone ボゾン	11
2.1.5 パイ中間子の質量	12
2.2 Chiral Anomaly	14
2.3 Anomaly 公式の証明	16
2.3.1 経路積分法による証明 (藤川和夫 1979)	16
2.4 クォークモデルにおけるカイラルアノマリー	17
2.4.1 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 崩壊	18
2.4.2 インスタントンと $U(1)_A$ 問題の解決	19
2.5 QCD 真空と QCD CP 問題	22
2.5.1 θ 真空	22
2.5.2 強い相互作用における CP の破れ	23
2.5.3 中性子電気双極子モーメント	25
2.6 QCD Axion	27
2.6.1 Instanton vacuum energy	27
2.6.2 Peccei-Quinn 対称性	28
2.6.3 Axion	30

2.7 Invisible axion	32
2.7.1 KSVZ 模型	34
2.7.2 DFSZ 模型	34
2.8 さらに一般化	35
第 3 章 Axiverse	37
3.1 超弦理論	37
3.2 10 次元超重力理論	40
3.2.1 I 型理論	40
3.2.2 II 型理論	41
3.3 Gauge and gravitational anomaly	43
3.3.1 一般的構造	43
3.3.2 10 次元超重力理論	44
3.3.3 Green-Schwarz 機構	46
3.4 Brane	48
3.4.1 分類	48
3.4.2 D ブレーンの作用積分	49
3.5 String axions	51
3.5.1 ヘテロ型理論	51
3.5.2 II 型理論	52
3.5.3 質量スペクトル	53
第 4 章 地上実験	54
4.1 New force	54
4.1.1 Scalar force	55
4.1.2 Pseudo-scalar force	55
4.1.3 実験的制限	57
4.2 検出実験	60
4.2.1 Project Overview	60
4.2.2 Cast experiment	61
第 5 章 Astrophysics	65
5.1 Axion emission processes	65
5.1.1 Overview	65
5.1.2 Primakoff process	65
5.2 Solar axion	67
5.2.1 基本公式	67
5.2.2 制限	68
5.3 球状星団星からの放出	68
5.3.1 水平分枝星	69

5.3.2	赤色巨星分枝星	69
5.4	WD cooling	70
5.4.1	WD 光度関数	71
5.4.2	ZZ Ceti stars	71
5.5	SN1987A	71
5.5.1	高密度核物質からのアクシオン放出率	71
5.5.2	リバースト時間	72
5.5.3	SN1987A gamma-ray flux (Solar Maximum Mission satellite)	73
5.6	磁場中でのアクシオン-光子変換	73
5.6.1	基礎方程式	73
5.6.2	伝播方程式	74
5.7	高エネルギーガンマ線への影響	76
5.7.1	Gamma 線ホライズン	77
5.7.2	CIRB 問題	78
5.7.3	観測可能性	82
第 6 章 一様等方宇宙モデル		85
6.1	基本観測情報	85
6.1.1	Hubble の法則	85
6.1.2	宇宙の銀河地図	87
6.1.3	宇宙背景放射	91
6.2	基礎方程式	94
6.3	単純な宇宙モデル	96
6.4	宇宙パラメーター	97
6.5	Friedmann モデル	98
6.6	宇宙年齢	99
6.7	特異点	100
6.8	光の伝搬	101
6.9	ホライズン	102
6.10	距離測定	103
6.10.1	方法	103
6.10.2	距離梯子	103
6.11	Hubble 定数	104
6.12	Extended Hubble diagram	105
6.12.1	赤方偏移-光度距離関係	105
6.12.2	パラメーター依存性	105
6.13	SNIa 観測	106
6.14	宇宙の物質組成	106
6.15	宇宙の熱史	110

6.16 CMB と宇宙音波	112
6.16.1 Jeans 長	112
6.16.2 宇宙音波	112
6.17 CMB による観測	116
6.18 宇宙パラメーター	120
第 7 章 Axion Cosmology	125
7.1 Homogeneous axion field	125
7.1.1 Evolution	125
7.1.2 Present abundance	127
7.2 CMB B-mode (birefringence)	132
7.2.1 偏光の記述	132
7.2.2 E モードと B モード	132
7.2.3 Flat sky 近似	133
7.2.4 フラックス強度テンソル	134
7.2.5 偏光に対する Boltzmann 方程式	137
7.2.6 最終散乱面での偏光	138
7.2.7 アクシオンによる B モード生成	140
7.3 CMB-axion conversion	143
7.4 Influence on LSS	146
7.4.1 Bosonic DM	146
7.4.2 Powerspectrum suppression	148
7.4.3 Estimation of deformation	150
7.4.4 数値計算	150
7.5 *Dark radiation とモジュライ問題	153
7.5.1 Moduli 問題	153
7.5.2 Dark radiation	155
7.6 *Isocurvature perturbations	156
7.7 Gyro インフレーションモデル	158
7.7.1 Chromo-Natural Inflation	158
7.7.2 CS 項がない場合 ($\lambda = 0$)	159
7.7.3 CS Inflation	160
7.7.4 数値解	162
7.7.5 一般論	167
第 8 章 Black holes	171
8.1 基本事項	171
8.1.1 ブラックホールの定義	171
8.1.2 Killing ホライズン	172

8.1.3 例	173
8.2 束縛状態と散乱	174
8.2.1 ブラックホール近傍での粒子の運動	174
8.2.2 Kerr BH でのゼロ質量場	176
8.3 増幅反射不安定	178
8.3.1 Kerr BH 時空での有質量スカラー場の方程式	179
8.3.2 増大率	180
8.4 実際に宇宙に存在するブラックホールの引き起こすアキソン不安定	186
8.4.1 $\mu - M$ 平面での不安定帯	186
8.4.2 G-atom	188
8.4.3 重力波放出	188
8.4.4 ボーズノバ	192
第 9 章 Superstring theory	212
9.1 *Universal axion (model-independent axion)	212
9.2 *Form field axions (model-dependent axions)	212
9.3 *Gauge anomaly and CS coupling	212
9.4 Examples	212
9.4.1 References	213
付録 A Lie 代数に関連した諸定義と公式	216
A.1 SU(3)	216
付録 B 特性類と指数定理	218
B.1 特性類	218
B.1.1 Euler 類	218
B.1.2 Chern 類	219
B.1.3 Pontrjagin 類	220
B.2 指数定理	221
B.2.1 一般 Atiyah-Singer 指数定理	221

1

Introduction

§1.1

What is axion?

Reviews

- Raffelt GG: “Stars as Laboratories for Fundamental Physics” (U. Chicago Press, 1996).
- Khlopov My: “Cosmoparticle physics” (WS, 1999)
- Kim JH: “Light Pseudoscalars, Particle Physics and Cosmology”, Phys. Rep. 150:1-177 (1987)
- Cheng HY: “The Strong CP Problem Revisited”, Phys. Rep. 158:1 (1988)
- Raffelt GG: “Astrophysical methods to constrain axions and other novel particle phenomena”, Phys. Rep. 198:1 (1990)
- Kuster M, Raffelt G, Beltran B (Editors): “Axions”, Lecture Notes in Physics 741 (Springer, 2008)

1.1.1 Axion and ALP

高エネルギースケールでの $U(1)$ ないしシフト対称性の破れに伴う小質量擬 Goldstone ボゾンを ALP と呼ぶ。基本的特徴付けは以下の通り:

1. (近似的) 対称性の自発的破れに伴う擬 Goldstone ボゾン.

2. 小さな質量 (< keV) .
3. SM 粒子との非常に弱い相互作用.
4. $\phi\gamma\gamma$ 相互作用.

– 擬 scalar の場合 : $L_{\phi\gamma\gamma} = \frac{1}{2}g_{\phi\gamma}\phi F \cdot \tilde{F} = g_{\phi\gamma}\phi \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$.

– scalar の場合 : $L'_{\phi\gamma\gamma} = \frac{1}{2}g_{\phi\gamma\gamma}\phi F \cdot F = g_{\phi\gamma}\phi(\mathbf{B}^2 - \mathbf{E}^2)$.

一般の ALP のなかで, アクシオンは次のような特徴をもつ :

1. カイラルなシフト対称性の破れに伴う中性擬スカラ粒子 (場)
 - これより, 相互作用が P および CP を保つとすると, P& CP-odd なスカラ密度とのみ結合.
 - 短距離で $1/r^n (n \geq 3)$ と振る舞い, 粒子間の力は粒子の速度やスピンの依存. このため, submm での第5の力計測からの制限が弱く, 粒子間力に基づく質量に対する下限がない.
2. tree レベルでシフト対称性 (カイラル)
 - Tree level の shift symmetry は摂動論的量子効果の影響を受けない. [Svrcek P, Witten E:JHEP0606, 051 (2006)]
 - 1. と 2. より, スカラ場およびスピノール場とは微分結合, ゲージ場とは CS 結合.
3. 非摂動論的效果 (インスタントン+カイラル SSB) により微小な質量
4. 大きな axion decay constant f_a .
5. カイラル対称性の anomaly を通して, ゲージ場と弱い Chern-Simons 結合をもつ.

$$\mathcal{L}_{\text{CS}} = \sum \frac{g^2}{8\pi^2} \xi_{ab} \text{Tr}(F^a \cdot \tilde{F}^b).$$

6. フェルミ粒子と微分結合をもつ.

$$\mathcal{L}_{\text{af}} = \sum \frac{y}{f_a} \partial_\mu \phi \bar{\Psi} \gamma_5 \gamma^\mu \Psi$$

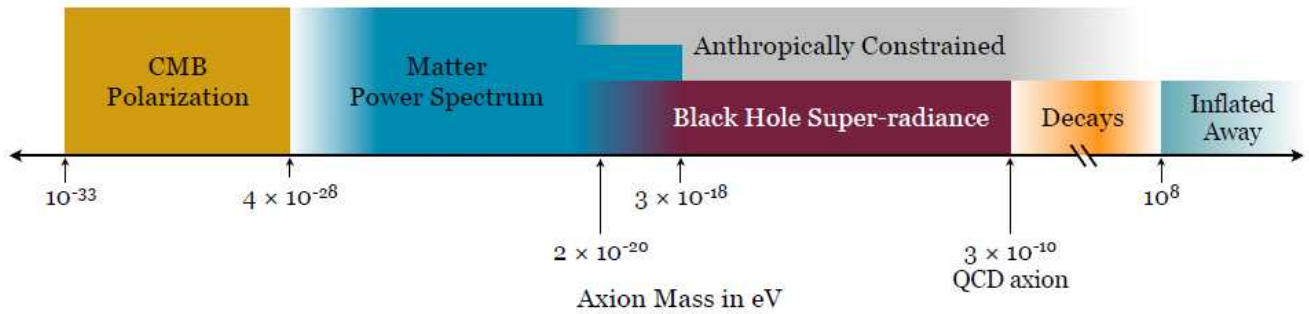


図 1.1: Axiverse

§1.2

アクシオンの引き起こす多様な宇宙現象

1.2.1 特徴的な質量スケール

Compton wavelength = Horizon size ($m \approx H$)

Present $t = t_0$: $m_0 = 1.5 \times 10^{-33} \text{eV}$ $c/H_0 = 4.3 \text{ Gpc}$

CMB last scattering $t = t_{\text{ls}}$: $m_{\text{ls}} = 2 \times 10^{-29} \text{eV}$ $c/H_0 = 300 \text{kpc}$

Equidensity time $t = t_{\text{eq}}$: $m_{\text{eq}} = 3 \times 10^{-28} \text{eV}$ $c/H_0 = 20 \text{kpc}$

Compton wavelength = BH size ($1/m = M_{\text{pl}}^2/M$)

Supermassive BH $M = 10^{10} M_{\odot}$: $m_{\text{bh,max}} = 1.3 \times 10^{-20} \text{eV}$ $1/m = 10^{-3} \text{ pc}$

Solar mass BH $M = 1 M_{\odot}$: $m_{\text{bh,min}} = 1.3 \times 10^{-10} \text{eV}$ $1/m = 3 \text{ km}$

QCD axion $m \approx \Lambda_{\text{QCD}}^2/f_a$

- $f_a = 10^{16} \text{GeV}$: $m \sim 10^{-9} \text{eV}$

- $f_a = 10^{12} \text{GeV}$: $m \sim 10^{-5} \text{eV}$

1.2.2 微小質量アクシオンの引き起こす多様な現象

- 存在量が重要となる現象
 - ボーズ型ダークマター
 - 宇宙ゆらぎスペクトルの変形

- Quintessence 型ダークエネルギー
- 重いモジュライ起源の dark radiation
- 相互作用が重要となる現象
 - 星の冷却
 - 太陽からの axion 放出
 - 太陽活動・熱輸送
 - Dark raditions
 - 原始重力波における CP の破れ
 - Gyro インフレーション
- 質量が重量となる現象
 - CMB Bモード生成
 - ブラックホール増幅反射不安定と Bose nova, および重力波放射
 - Dark energy
- f_a が重要となる現象
 - アクシオン等曲率ゆらぎ
- 磁場が重要となる現象
 - Dark radiations
 - 高エネルギーガンマー線の宇宙背景放射透過

2

QCD axion

§2.1

QCDにおけるカイラル対称性の破れ

2.1.1 QCDのChiral対称性

要点: QCDのu, dクォークセクターにおける $U(2)_A$ 対称性の破れには, 不思議な点がある.

詳細: クォークとして近似的に, uとdのみを考える.

- QCDセクターのLagrangian:

$$\mathcal{L} = -i\bar{u}(\gamma^\mu D_\mu - m_u)u - i\bar{d}(\gamma^\mu D_\mu - m_d)d, \quad (2.1.1)$$

$$D_\mu = \partial_\mu - ig_3 C_\mu^a T_a. \quad (2.1.2)$$

ここで, C_μ^a はSU(3)ゲージ場, T_a はSU(3)の基本表現の基底.

- Weyl基底での表示:

$$\begin{aligned} -i\bar{\psi}(\gamma^\mu D_\mu - m)\psi &= i\psi_R^\dagger(D_0\psi_R - \sigma^j D_j\psi_R) + i\psi_L^\dagger(D_0\psi_L + \sigma^j D_j\psi_L) \\ &\quad + m(\psi_L^\dagger\psi_R + \psi_R^\dagger\psi_L). \end{aligned} \quad (2.1.3)$$

- $U(2)_L \times U(2)_R$ 対称性: クォーク質量がゼロの時 ($m_u = m_d = 0$), このLagrangianは次の $U_L \times U_R \in U(2)_L \times U(2)_R$ で不変となる:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_R \mapsto U_R \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_R, \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \mapsto U_L \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad (2.1.4)$$

しかし、質量がゼロでない質量項がこの不変性を壊す。一般に、質量項を質量行列を用いて

$$(\bar{u}, \bar{d})_R M \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_R + \text{h.c.} \quad (2.1.5)$$

とおくと、 $U(2)_L \times U(2)_R$ 変換に対して、質量行列は

$$M \rightarrow U_L^\dagger M U_R \quad (2.1.6)$$

と変換する。これより、 $m_u = m_d$ のとき、ベクトル型変換 $U_R = U_L$ に対しては質量項は不変となるが、軸性ベクトル型変換 $U_R = U_L^\dagger$ に対しては不変でない。

- ベクトル・軸性ベクトル分解：一般に、

$$U(2)_R \times U(2)_L \cong U(1)_b \times U(1)_A \times (SU(2)_V \times SU(2)_A). \quad (2.1.7)$$

ここで、 $\theta \in \mathbb{R}$, $U \in SU(2)$ として、

$$U(1)_b : (u, d) \rightarrow e^{i\theta}(u, d), \quad (2.1.8a)$$

$$SU(2)_V : \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \rightarrow U \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad (2.1.8b)$$

$$U(1)_A : (u, d) \rightarrow e^{i\theta\gamma^5}(u, d), \quad (2.1.8c)$$

$$SU(2)_A : \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_R \rightarrow U \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_R, \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \rightarrow U^\dagger \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L. \quad (2.1.8d)$$

ただし、 $SU(2)_V$ は部分群であるが、 $SU(2)_A$ は部分群ではなく、

$$[SU(2)_V, SU(2)_A] \subset SU(2)_A, \quad [SU(2)_A, SU(2)_A] \subset SU(2)_V. \quad (2.1.9)$$

- 近似的 $SU(2)_V$ 対称性：現実では、

$$m_u = 2.3_{-0.5}^{+0.7} \text{MeV}, \quad m_d = 4.8_{-0.3}^{+0.7} \text{MeV} \quad (2.1.10)$$

より、 $m_u \neq m_d$ であるが、近似的にベクトル型変換 $U_L = U_R \Rightarrow U(2)_V = SU(2)_V \times U(1)_b$ に対する近似的不変性がハドロンスペクトルで実現されている。

- $m_p = 938.272046 \pm 0.000021 \text{MeV}$, $m_n = 939.565379 \pm 0.000021 \text{MeV}$.
- $m_{\pi^0} = 134.9766 \pm 0.0006 \text{MeV}$, $m_{\pi^\pm} = 139.57018 \pm 0.00035 \text{MeV}$.

- $SU(2)_A$ 対称性の破れ: $SU(2)_A$ 対称性があると, スピン, 質量が同じで異なるパリティをもつ多重項がないといけませんが, そのような多重項は近似的にもハドロンスペクトルに存在しない. これは, カイラル対称性が非摂動論効果 (インスタントン効果) により自発的に破れているためと理解されている. 実際, この破れに対する擬 Goldstone ボゾンをパイ中間子とするのが自然であることを示唆する事実が多く存在する. 例えば, Goldberger-Treiman 関係式 (1966):

$$G_{\pi N} = \frac{2m_N g_A}{F_\pi}. \quad (2.1.11)$$

- $U(1)_A$ 問題: $SU(2)_A$ と異なり, $U(1)_A$ に対応するパイ中間子程度の質量をもつ擬 Goldstone ボゾンが存在しない.

$$\eta: I^G(J^{PC}) = 0^+(0^{-+}): \quad m_\eta = 547.862 \pm 0.018 \text{MeV}. \quad (2.1.12)$$

2.1.2 対称性の自発的破れ

Reference

- Weinberg S: “The Quantum Theory of Fields”, vol. II (CUP, 1995).

大域的変換群 G の線形作用に対して作用積分が不変であるとする. このとき, 特に, スカラ場 $\phi = (\phi_n)$ への作用

$$\phi \mapsto U\phi, \quad U \in G \quad (2.1.13)$$

に対して, その運動項とポテンシャル $V(\phi)$ が不変となる: $V(U\phi) = V(\phi)$. このポテンシャルの極点 $\phi = \phi_0$ が G の作用に対して不変でないとする:

$$(DV)_{\phi_0} = 0, \quad t_a \phi_0 \neq 0, \quad t_a \in \mathcal{L}(G). \quad (2.1.14)$$

要点: 自発的に破れた対称性に対応するカレント J_μ^a とスカラ場 ϕ の交換関係をスペクトル表示することにより, 自発的対称性が必ず Goldstone ボゾン B を伴うことが示され, さらにスカラ場への B の寄与が B の崩壊定数 (カレントへの B の寄与) により決定される [Goldstone J, Salam A, Weinberg S (1962)]

詳細: 対称性 G に対するカレントを $J_\mu^a(x)$ とすると, 理論の Poincare 不変性より

$$\langle [J_a^\lambda(y), \phi_n(x)] \rangle_{\text{vac}} = \frac{i}{(2\pi)^3} \int d^4 p p^\lambda \theta(p^0) [\rho_{a,n}(-p^2) e^{ip \cdot (y-x)} - \tilde{\rho}_{a,n}(-p^2) e^{ip \cdot (x-y)}]. \quad (2.1.15)$$

ここで,

$$\frac{ip^\lambda}{(2\pi)^3} \rho_{a,n}(-p^2) \theta(p^0) = \sum_N \langle \text{Vac} | J_a^\lambda(0) | N \rangle \langle N | \phi_n(0) | \text{Vac} \rangle \delta^4(p - p_N), \quad (2.1.16a)$$

$$\frac{ip^\lambda}{(2\pi)^3} \tilde{\rho}_{a,n}(-p^2) \theta(p^0) = \sum_N \langle \text{Vac} | \phi_n(0) | N \rangle \langle N | J_a^\lambda(0) | \text{Vac} \rangle \delta^4(p - p_N). \quad (2.1.16b)$$

この式は, Green 関数

$$\Delta_+(z; \mu^2) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int d^4p \theta(p^0) \delta(p^2 + \mu^2) e^{ip \cdot z} \quad (2.1.17)$$

を用いて,

$$\langle [J_{a\lambda}(y), \phi_n(x)] \rangle_{\text{Vac}} = \frac{\partial}{\partial y^\lambda} \int d\mu^2 [\rho_{a,n}(\mu^2) \Delta_+(y-x; \mu^2) + \tilde{\rho}_{a,n}(\mu^2) \Delta_+(x-y; \mu^2)]. \quad (2.1.18)$$

と書き換えられる.

まず, $x-y$ が空間的なとき, $[J_a^\lambda(y), \phi_n(x)] = 0$ より

$$\int d\mu^2 \frac{\rho_{a,n}(\mu^2) + \tilde{\rho}_{a,n}(\mu^2)}{\sqrt{p^2 + \mu^2}} = 0, \quad \forall p \Rightarrow \rho_{a,n}(\mu^2) = -\tilde{\rho}_{a,n}(\mu^2). \quad (2.1.19)$$

次に, $\partial_\lambda J_a^\lambda = 0$ より,

$$\int d\mu^2 \mu^2 \rho_{a,n}(\mu^2) \frac{\sin(t\sqrt{p^2 + \mu^2})}{\sqrt{p^2 + \mu^2}}, \quad \forall t \Rightarrow \mu^2 \rho_{a,n}(\mu^2) = 0. \quad (2.1.20)$$

さらに,

$$Q_a = \int d^3x J_{a0}(x, 0), \quad [Q_a, \phi_n(x)] = (t_a)_n^m \phi_m(x) \quad (2.1.21)$$

より, $\rho_{a,n}(\mu^2) \propto \delta(\mu^2)$ の比例係数が次のように定まる:

$$\rho_{a,n}(\mu^2) = i\delta(\mu^2) (t_a)_n^m \langle \phi_m(0) \rangle_{\text{Vac}}. \quad (2.1.22)$$

これは, $\rho_{a,n}(-p^2)$ の定義より, $t_a \phi_0 \neq 0$ となる各無限小変換 t_a ごとにゼロ質量のボゾン B^a が存在することを意味し, B_a の自由場に対する生成・消滅演算子と一粒子状態を

$$B_a(x) = \int \frac{d^3x}{(2\pi)^3} (b_a(\mathbf{p}) e^{ip \cdot x} + b_a(\mathbf{p})^\dagger e^{-ip \cdot x}), \quad (2.1.23)$$

$$[b_a(\mathbf{p}), b_{a'}(\mathbf{p}')^\dagger] = \frac{(2\pi)^3}{2\omega} \delta_{aa'} \delta^3(\mathbf{p} - \mathbf{p}'), \quad (2.1.24)$$

$$\langle 0 | B_a(x) | \mathbf{p}, a' \rangle = \langle 0 | B_a(x) b_{a'}(\mathbf{p})^\dagger | 0 \rangle = \delta_{aa'} \frac{e^{-ip \cdot x}}{2\omega}, \quad (2.1.25)$$

により定義すると、Poincare 不変性より

$$\langle \text{Vac} | J_a^\lambda(x) | B_b \rangle = -iF_{ab}p^{\lambda B} \frac{e^{ip_B \cdot x}}{2p_B^0}, \quad (2.1.26a)$$

$$\langle B_a | \phi_n(y) | \text{Vac} \rangle = Z_n^a \frac{e^{-ip_B \cdot y}}{2p_B^0} \quad (2.1.26b)$$

と置くと、 $\rho_{a,n}(\mu^2)$ の定義より、

$$\rho_{a,n}(\mu^2) = \sum_b F_{ab} Z_n^b \delta(\mu^2) \quad (2.1.27)$$

これを (2.1.22) に代入して、

$$iF_{ab} Z_n^b = -(t_a)_n^m \langle \phi_m(0) \rangle_{\text{Vac}}. \quad (2.1.28)$$

すなわち、

$$\phi_n(x) = \sum_a Z_n^a B_a(x) + \dots, \quad (2.1.29a)$$

$$Z_n^a = \sum_b (F^{-1})^{ab} (it_b \phi_0)_n \quad (2.1.29b)$$

を得る。

2.1.3 Goldberger-Treiman 関係式

要点： Goldberger-Treiman 関係式は、パイ中間子の強い相互作用結合係数と弱い相互作用による崩壊定数を関係付け、パイ中間子が $SU(2)_A$ 対称性の自発的破れに伴う Goldstone ボゾンである証拠を与える。

詳細： まず、 u, d クォークとレプトンの間の弱い相互作用に対する有効 Lagrangian は

$$\mathcal{L}_{\text{wk}} = -\frac{G_{\text{wk}}}{\sqrt{2}} (V_+^\mu - A_+^\mu) \sum_\ell \bar{\ell} \gamma_\mu (1 - \gamma_5) \nu_\ell + \text{h.c.} \quad (2.1.30)$$

ここで、 V_a^μ と A_a^μ を変換 $SU(2)_V$ および $SU(2)_A$ に対するカレントとして、

$$V_\pm^\mu = V_1^\mu \pm iV_2^\mu, \quad A_\pm^\mu = A_1^\mu \pm iA_2^\mu. \quad (2.1.31)$$

π_j が $SU(2)_A$ に対する擬 Goldstone ボゾンとすると、

$$\langle \text{Vac} | A_i^\mu(x) | \pi_j \rangle = -\frac{1}{2} F_\pi p_\pi^\mu \delta_{ij} \frac{e^{ip_\pi \cdot x}}{2p_\pi^0}. \quad (2.1.32)$$

これより,

$$\Gamma(\pi \rightarrow \mu + \nu) = \frac{G_{\text{wk}}^2 F_\pi^2 m_\mu^2 (m_\pi^2 - m_\mu^2)^2}{16\pi m_\pi^3} \quad (2.1.33)$$

が得られる. これと実験値, $\Gamma = (2.6033(24) \times 10^{-8}\text{s})^{-1}$ より,

$$F_\pi \simeq 184\text{MeV}. \quad (2.1.34)$$

一方, 軸性カレントの核子状態での行列要素は, Poincare 不変性より

$$\langle p | A_+^\mu(x) | n \rangle = \frac{e^{iq \cdot x}}{(2\pi)^3} \bar{u}_p [\gamma^\mu \gamma_5 f(q^2) + iq^\mu \gamma_5 g(q^2) - 2q_\nu \gamma^{\mu\nu} \gamma_5 h(q^2)] u_n. \quad (2.1.35)$$

カレントの保存則を仮定すると,

$$2m_N f(q^2) = q^2 g(q^2). \quad (2.1.36)$$

核子のベータ崩壊実験より, $f(q^2)$ は $q^2 = 0$ に極を持たず,

$$f(0) \equiv g_A = 1.2573(28) \quad (2.1.37)$$

したがって, $g(q^2)$ は $q^2 = 0$ に極をもつ:

$$g(q^2) \rightarrow \frac{2m_N g_A}{q^2}. \quad (2.1.38)$$

一方,

$$A_j^\mu(x) = \frac{1}{2} F_\pi \partial^\mu \pi_j + \dots \quad (2.1.39)$$

として, π と核子の有効相互作用を $2G_{\pi N} \pi^j \bar{N} \gamma_5 t_j N$ とおくと, $q^2 \rightarrow 0$ の極限で,

$$\langle p | A_+^\mu(x) | n \rangle \rightarrow \frac{e^{iq \cdot x}}{(2\pi)^3} [-i(2\pi)^4 2G_{\pi N} \bar{u}_p \gamma_5 u_n] \frac{-i}{(2\pi)^4 q^2} \frac{iq^\mu F_\pi}{2}. \quad (2.1.40)$$

これは,

$$g(q^2) \rightarrow \frac{G_{\pi N} F_\pi}{q^2} \quad (2.1.41)$$

を意味する. 以上2つの $g(q^2)$ の振る舞いが一致することより, 次の Goldberger-Treiman 関係式を得る:

$$G_{\pi N} = \frac{2m_N g_A}{F_\pi}. \quad (2.1.42)$$

g_A , F_π の実験値よりこの式は, $G_{\pi N} \simeq 12.7$ を与えるが, これは, $G_{\pi N}$ の測定値 13.5 と良く一致している.

2.1.4 近似的対称性の自発的破れと擬 Goldstone ボゾン

要点: 系がある近似的対称性を持つ場合、ポテンシャルの縮退は解消されるが、基底状態で対称性が厳密で自発的に破れる場合と同じ数の小さな質量をもつボゾン（擬 Goldstone ボゾン）が現れる．この基底状態に対応するポテンシャル極点とボゾンの質量は、対称性を破るポテンシャルの摂動を用いて具体的に表される．
[Weinberg S (1972)]

詳細: 対称性 G をもつスカラ場のポテンシャル V_0 に小さな摂動 V_1 を加える:

$$V = V_0(\phi) + V_1(\phi); \quad (DV_0)_\phi(t_\alpha\phi) = 0. \quad (2.1.43)$$

V の極小点を、適当な V_0 の極小点 ϕ_0 を用いて、 $\bar{\phi} = \phi_0 + \phi_1$ とおく． ϕ_1 が小さいとして、極小条件を1次までとると

$$(DV_0)_{\phi_0} = 0, \quad (DV)_{\phi_0+\phi_1} = 0 \Rightarrow (D^2V_0)_{\phi_0}(\phi_1, \chi) + (DV_1)_{\phi_0}\chi = 0; \quad \forall \chi. \quad (2.1.44)$$

V_0 の極小多様体が G の作用で不変なので、

$$(D^2V_0)_{\phi_0}(t_\alpha\phi_0) = 0, \quad \forall \alpha. \quad (2.1.45)$$

よって、上の方程式が ϕ_1 について解ける条件として、 V_0 の極点の選び方を決める次の真空整列条件 (vacuum alignment condition) が得られる:

$$(DV_1)_{\phi_0}(t_\alpha\phi_0) = 0, \quad \forall \alpha. \quad (2.1.46)$$

G がコンパクトのとき、 $V_1(g\phi_0)$ ($g \in G$) がコンパクト空間 G 上の関数となり、必ず極値を持つので、この条件を満たす ϕ_0 が常に存在する．

擬 Goldstone ボゾンの質量は、 $(D^2V_0)_{\phi_0}(Z^a, Z^b) \propto (F^{-1})^{ac}(F^{-1})^{bd}(D^2V_0)_{\phi_0}t_c\phi_0t_d\phi_0$ より、一般に

$$\begin{aligned} M_{ab}^2 &= Z_n^a Z_m^b \left. \frac{\partial^2 V(\phi)}{\partial \phi_m \partial \phi_n} \right|_{\phi=\phi_0+\phi_1} \\ &\simeq (D^3V_0)_{\phi_0}(\phi_1, Z^a, Z^b) + (D^2V_1)_{\phi_0}(Z^a, Z^b). \end{aligned} \quad (2.1.47)$$

V_0 の対称性より、この式は次のように書き換えられる:

$$M_{ab}^2 = - \sum_{cd} (F^{-1})^{ac}(F^{-1})^{bd} [(D^2V_1)_{\phi_0}(t_c\phi_0, t_d\phi_0) + (DV_1)_{\phi_0}(t_c t_d\phi_0)]. \quad (2.1.48)$$

この質量行列は常に非負であることが示される．

G のある表現

$$[T_\alpha, \Phi_n] = -(t_\alpha)_{nm} \Phi_m \quad (2.1.49)$$

に従う作用素の系 $\{\Phi_n\}$ を用いて, Hamiltonian に対する対称性を破る摂動が

$$H_1 = \sum_n u_n \Phi_n \quad (2.1.50)$$

と表されるとする. さらに,

$$\langle \Phi_n \rangle = \phi_n \quad (2.1.51)$$

が成り立つときには, 真空整列条件は

$$\langle [T_\alpha, H_1] \rangle_0 = 0 \quad (2.1.52)$$

と表される. また, 擬 Goldstone ボゾンの質量行列は

$$M_{ab}^2 = - \sum_{c,d} (F^{-1})^{ac} (F^{-1})^{bd} \langle [T_c, [T_d, H_1]] \rangle_0 \quad (2.1.53)$$

となる. ここで, a, b, c, d は Goldstone 方向成分を指す.

2.1.5 パイ中間子の質量

要点: パイ中間子は, クォーク質量によりわずかに破れたカイラル対称性 $SU(2)_A$ にともなう擬 Goldstone ボゾンと見なすことができる. そこで, 前節の公式を用いて, パイ中間子の質量公式を導くことができる.

詳細: $q = (u, d)$ 系において, $\Phi_\alpha^\pm (\alpha = 1, 2, 3, 4)$ を次のように定義する:

$$\Phi_a^+ = -\bar{q}\gamma_5 t_a q \quad (a = 1, 2, 3), \quad \Phi_4^+ = \frac{i}{2}\bar{q}q, \quad (2.1.54a)$$

$$\Phi_a^- = i\bar{q}t_a q \quad (a = 1, 2, 3), \quad \Phi_4^- = \frac{1}{2}\bar{q}\gamma_5 q. \quad (2.1.54b)$$

このとき, (T_a, X_a) を $SU(2)_V \times SU(2)_A$ の無限小変換に対応するエルミート作用素, $(\mathcal{T}_j, \mathcal{X}_j)$ を $SU(2) \times SU(2) \cong SO(4)$ 対応によるその4次元ベクトル表現とすると,

$$SU(2)_V : q \rightarrow e^{i\theta^a t_a} q, \quad \bar{q} \rightarrow \bar{q} e^{-i\theta^a t_a}, \quad (2.1.55a)$$

$$SU(2)_A : q \rightarrow e^{i\theta^a t_a \gamma_5} q, \quad \bar{q} \rightarrow \bar{q} e^{i\theta^a t_a}, \quad (2.1.55b)$$

より,

$$[T_a, \Phi_n^\pm] = - \sum_m (\mathcal{T}_a)_{nm} \Phi_m^\pm, \quad [X_b, \Phi_n^\pm] = - \sum_m (\mathcal{X}_a)_{nm} \Phi_m^\pm. \quad (2.1.56)$$

$\mathcal{T}_a, \mathcal{X}_a$ の具体的な表式は,

$$(\mathcal{T}_a)_{bc} = -i\epsilon_{abc}, \quad (\mathcal{T}_a)_{4b} = (\mathcal{T}_a)_{b4} = (\mathcal{T}_a)_{44} = 0, \quad (2.1.57a)$$

$$(\mathcal{X}_a)_{b4} = -(\mathcal{X}_a)_{4b} = \delta_{ab}, \quad (\mathcal{X}_c)_{ab} = (\mathcal{X}_c)_{44} = 0. \quad (2.1.57b)$$

(u, d) 系において, $SU(2)_V \times SU(2)_A$ 対称性を直接破るのは, クォークの質量項のみ:

$$H_1 = i(m_u \bar{u}u + m_d \bar{d}d) = (m_u + m_d)\Phi_4^+ + (m_u - m_d)\Phi_3^-. \quad (2.1.58)$$

ここで,

$$[T_a, \Phi_4^+] = 0, \quad [T_a, \Phi_3^-] = i\epsilon_{a3c}\Phi_c^-, \quad (2.1.59a)$$

$$[X_a, \Phi_4^+] = \Phi_a^+, \quad [X_a, \Phi_3^-] = -\Phi_4^- \delta_{a,3}. \quad (2.1.59b)$$

よって, 真空整列条件は

$$\begin{aligned} 0 &= \langle \Phi_2^- \rangle_0 = \langle \Phi_1^- \rangle_0 = \langle \Phi_1^+ \rangle_0 = \langle \Phi_2^+ \rangle_0 \\ &= (m_u + m_d)\langle \Phi_3^+ \rangle_0 + (m_d - m_u)\langle \Phi_4^- \rangle_0. \end{aligned} \quad (2.1.60)$$

対称性が厳密なゼロ次系 ($m_u = m_d = 0$) において, ゼロ次の真空 ϕ_0 を, $SU(2)_V$ 不変かつパリティ不変に選ぶと,

$$\langle \Phi_n^- \rangle_0 = 0 \quad (n = 1, 2, 3, 4), \quad \langle \Phi_a^+ \rangle_0 = 0 \quad (a = 1, 2, 3) \quad (2.1.61)$$

となり, 真空整列条件が満たされる.

対称性が破れるカイラル方向に対して,

$$[X_a, [X_b, \Phi_4^+]] = \delta_{ab}\Phi_4^+, \quad [X_a, [X_b, \Phi_3^-]] = \Phi_a^- \delta_{b3}. \quad (2.1.62)$$

また, $SU(2)_V$ 対称性より,

$$F_{ab} = \frac{1}{2}F_\pi \delta_{ab}. \quad (2.1.63)$$

よって,

$$m_{ab}^2 = \delta_{ab}m_\pi^2; \quad m_\pi^2 = -4(m_u + m_d)\langle \Phi_4^+ \rangle_0 / F_\pi^2. \quad (2.1.64)$$

(u, d) 系の $SU(2)_V \times SU(2)_A$ 対称性の議論は, $\tilde{q} = (u, d, s)$ 系に拡張することができ. このとき, $SU(3)_A$ の破れに対応して, 8個のボゾン ($\pi^\pm, \pi^0, K^\pm, K^0, \bar{K}^0, \eta^0$) が現れる. 以上と同様の計算により, カイラル対称性の破れが

$$\langle \bar{\tilde{q}}_n \gamma_5 \tilde{q}_m \rangle_0 = 0, \quad \langle \bar{\tilde{q}}_n \tilde{q}_m \rangle_0 = -v\delta_{nm} \quad (2.1.65)$$

と表されるとすると, 擬 Goldstone ボゾンの質量は

$$m_{\pi^0}^2 = \frac{4v}{F_\pi^2} [m_u + m_d], \quad (2.1.66a)$$

$$m_{\pi^+}^2 = m_{\pi^0}^2 + \Delta, \quad (2.1.66b)$$

$$m_{K^+}^2 = \frac{4v}{F_\pi^2} [m_u + m_s] + \Delta, \quad (2.1.66c)$$

$$m_{K^0}^2 = \frac{4v}{F_\pi^2} [m_d + m_s], \quad (2.1.66d)$$

$$m_{\eta^0}^2 = \frac{4v}{F_\pi^2} \left[\frac{4m_s + m_d + m_u}{3} \right], \quad (2.1.66e)$$

$$m_{\pi\eta}^2 = \frac{4v}{\sqrt{3}F_\pi^2} [m_u - m_d]. \quad (2.1.66f)$$

ここで, Δ は電磁相互作用による補正. 特に, これらより, 次の Gell-Mann-Okubo 関係式

$$3m_\eta^2 + 2m_{\pi^+}^2 - m_{\pi^0}^2 = 2m_{K^+}^2 + 2m_{K^0}^2 \quad (2.1.67)$$

を得る. 実験値は,

$$\begin{aligned} m_{\pi^+} &= 139.57\text{MeV}, & m_{\pi^0} &= 134.974\text{MeV}, \\ m_{K^+} &= 493.65\text{MeV}, & m_{K^0} &= 497.7\text{MeV}, \\ m_{\eta^0} &= 547\text{MeV}. \end{aligned} \quad (2.1.68)$$

すなわち, Gell-Mann-Okubo 関係式は 3% の精度でなりたつ. また, クォーク質量の比は

$$m_d/m_s = 0.050, \quad m_u/m_s = 0.027. \quad (2.1.69)$$

§2.2

Chiral Anomaly

要約: カイラルカレントは, それを構成しているフェルミ粒子がゲージ相互作用すると, 一般的に量子効果によりアノマリーが生じ, カレントの保存則に位相的なゲージ補正項が加わる [Bell JS, Jackiw R (1969); Adler SL (1969)].

参考文献

- Harvey JA: "TASI 2003 Lecture notes on Anomalies" [arXiv:hep-th/0509097]
- Adler SL: "Anomalies" [arXiv:hep-th/0411038]

可換ゲージ場の Triangle Anomaly

- Lagrangian

$$\mathcal{L} = -i\bar{\psi}(\gamma^\mu D_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}, \quad (2.2.1)$$

$$D_\mu = \partial_\mu + ieA_\mu \quad (2.2.2)$$

- 古典的対称性: 一般に,

$$\psi \mapsto e^{i\alpha}\psi \quad (2.2.3)$$

質量 $m = 0$ のとき, さらに

$$\psi \mapsto e^{i\beta\gamma_5}\psi \quad (2.2.4)$$

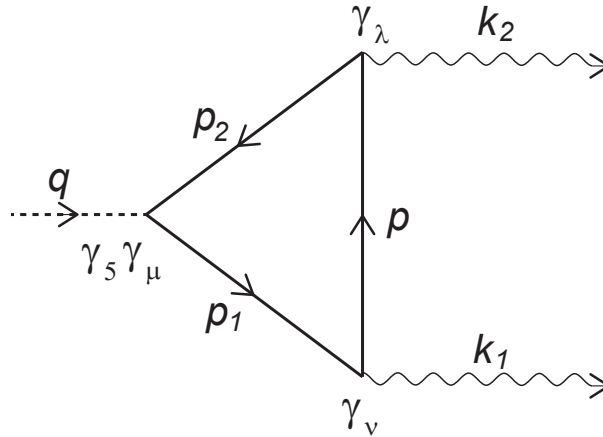


図 2.1: Triangle Diagram

- 保存則（量子論）

$$J^\mu = \bar{\psi} \gamma^\mu \psi \quad : \quad \partial_\mu J^\mu = 0, \tag{2.2.5a}$$

$$J_5^\mu = \bar{\psi} \gamma^\mu \gamma_5 \psi \quad : \quad \partial_\mu J_5^\mu = -2m \bar{\psi} \gamma_5 \psi + \frac{e^2}{8\pi^2} F^{\mu\nu} \tilde{F}_{\mu\nu}. \tag{2.2.5b}$$

ここで,

$$\tilde{F}_{\mu\nu} = *F_{\mu\nu} := \frac{1}{2} \epsilon_{\mu\nu\lambda\sigma} F^{\lambda\sigma}. \tag{2.2.6}$$

Adler-Bardeen-Jackiw(ABJ) anomaly

- 不可避性：正則化においてベクトルカレントの保存を要請すると，軸性ベクトルカレントの保存則には anomaly が発生し，その値は正則化の方法に依存しない。
- 非くり込み定理：くり込みにより形を変えない。[Adler-Bardeen の定理]
- 普遍性：非可換ゲージ場，重力場との結合もカイラルアノマリーを生む。

$$\begin{aligned} D_\mu &= \nabla_\mu - i g t_a A_\mu^a, \quad J_5^\mu = \bar{\psi} \gamma^\mu \gamma_5 \psi \\ \Rightarrow \partial_\mu J_5^\mu &= \dots + \frac{g^2}{8\pi^2} \text{Tr}(t_a t_b) F_{\mu\nu}^a \tilde{F}^{b\mu\nu} + \frac{1}{384\pi^2} \text{Tr}(t) R_{\mu\nu\lambda\sigma} \tilde{R}^{\mu\nu\lambda\sigma} \end{aligned} \tag{2.2.7}$$

- 物理的には，アノマリーはインスタントンとスピノール場の相互作用により引き起こされる。
- 様々な証明法

- Cut off による正則化.
- Pauli-Villars 正則化.
- Point-splitting 正則化.
- 藤川による経路積分法:PI measure の正則化と Athiya-Singer 指数定理.

§2.3

Anomaly 公式の証明

2.3.1 経路積分法による証明 (藤川和夫 1979)

ゲージ場 A 中でのスピノール場 ψ に対する分配関数 Z は経路積分で

$$Z[A] = \int [d\psi][d\bar{\psi}] e^{iS(\psi, \bar{\psi}; A)} \quad (2.3.1)$$

と表される. この経路積分において, 変換

$$\psi \rightarrow U\psi, \quad (2.3.2a)$$

$$\bar{\psi} \rightarrow \bar{\psi}(\gamma_4 U^\dagger \gamma_4), \quad \bar{\psi} = \psi^\dagger \gamma_4, \quad \gamma_4 = i\gamma^0, \quad (2.3.2b)$$

に対して, スピノール場の経路積分測度は次のように変換する:

$$[d\psi][d\bar{\psi}] \rightarrow [\det \mathcal{U} \det \bar{\mathcal{U}}]^{-1} [d\psi][d\bar{\psi}], \quad (2.3.3)$$

$$\mathcal{U}_{xn,ym} = U(x)_{nm} \delta^4(x-y), \quad (2.3.4)$$

$$\bar{\mathcal{U}}_{xn,ym} = (\gamma_4 U(x)^\dagger \gamma_4)_{nm} \delta^4(x-y). \quad (2.3.5)$$

特に, $U(x) = e^{i\alpha(x)\gamma_5}$ に対しては, $\bar{\mathcal{U}}\mathcal{U} = 1$ より, $[d\psi][d\bar{\psi}]$ は不変となる. 一方, $U(x) = e^{i\alpha(x)\gamma_5}$ に対しては, $\bar{\mathcal{U}} = \mathcal{U}$ となるので, 測度は不変とならない:

$$\begin{aligned} [d\psi][d\bar{\psi}] &\rightarrow (\det \mathcal{U})^{-2} [d\psi][d\bar{\psi}] \\ &= \exp \left\{ i \int d^4x \alpha(x) \mathcal{P}(x) \right\} [d\psi][d\bar{\psi}]. \end{aligned} \quad (2.3.6)$$

したがって, Z 全体は

$$Z \rightarrow \int [d\psi][d\bar{\psi}] \exp \left[i \int d^4x (\alpha(x) \mathcal{P}(x) + J_5^\mu(x) \partial_\mu \alpha(x)) \right]. \quad (2.3.7)$$

Z は積分変数の変換では変化しないので, これより,

$$\langle \partial_\mu J_5^\mu(x) \rangle_A = \mathcal{P}(x). \quad (2.3.8)$$

Anomaly $\mathcal{P}(x)$ は形式的には不定となる：

$$\mathcal{P}(x) = -2\text{Tr}(\gamma_5 t)\delta^4(x-x). \quad (2.3.9)$$

そこで、次のように正則化する：

$$\mathcal{P}(x) = \lim_{M \rightarrow \infty} [-2\text{Tr} \{ \gamma_5 t f(-\mathcal{D}_x^2/M^2) \} \delta^4(x-y)]_{y \rightarrow x}. \quad (2.3.10)$$

ここで、 $f(u)$ は $f(0) = 1$ となるなめらかなコンパクト台の関数。また、

$$D_\mu = \partial_\mu - it_a A_\mu^a(x). \quad (2.3.11)$$

Fourier 変換により

$$\begin{aligned} \mathcal{P}(x) &= \lim -2 \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} [\text{Tr} \{ \gamma_5 t f(-\mathcal{D}_x^2/M^2) e^{ik(x-y)} \}]_{y=x} \\ &= \lim -2 \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} [\text{Tr} \{ \gamma_5 t f(-(i\mathbf{k} + \mathcal{D})^2/M^2) \}] \\ &= \lim -2M^4 \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} [\text{Tr} \{ \gamma_5 t f(-(i\mathbf{k} + \mathcal{D}/M)^2) \}] \\ &= - \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} f''(k^2) [\text{Tr} \{ \gamma_5 t \mathcal{D}^4 \}] \end{aligned} \quad (2.3.12)$$

ここで、Wick 回転により

$$\int d^4 k f''(k^2) = i\pi^2 \int_0^\infty ds s f''(s) = i\pi^2. \quad (2.3.13)$$

また、

$$\mathcal{D}^2 = D^2 - \frac{i}{2} t_a F_{\mu\nu}^a \gamma^{\mu\nu}, \quad (2.3.14)$$

$$\text{Tr} \{ t \gamma_5 \mathcal{D}^4 \} = 2i \text{Tr}(t_a t_b t) F_{\mu\nu}^a \tilde{F}^{b\mu\nu}. \quad (2.3.15)$$

以上より、

$$\langle \partial_\mu J_5^\mu(x) \rangle_A = \mathcal{P}(x), \quad (2.3.16)$$

$$\mathcal{P}(x) = \frac{1}{8\pi^2} F_{\mu\nu}^a \tilde{F}^{b\mu\nu} \text{Tr}(t_a t_b t). \quad (2.3.17)$$

この式は、

$$\text{Tr}(t_a t_b t) = N\delta_{ab} \quad (2.3.18)$$

となる場合には、次のような保存系に書き直すことができる：

$$\partial_\mu K^\mu = 0; \quad K^\mu = \langle J_5^\mu \rangle_A + 2NG^\mu, \quad (2.3.19)$$

$$G^\mu := -\frac{1}{8\pi^2} \epsilon^{\mu\nu\lambda\rho} [A_\nu^a \partial_\lambda A_\rho^a + \frac{1}{3} f_{abc} A_\nu^a A_\lambda^b A_\rho^c]. \quad (2.3.20)$$

 §2.4

クォークモデルにおけるカイラルアノーマリー

2.4.1 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 崩壊

要点： π^0 はカイラルな U(1) 変換に対する擬 Goldstone ボゾンであるが、その 2 光子崩壊は、このカイラル対称性のアノーマリーにより引き起こされる。

軸性カイラルカレントのアノーマリーによる Goldstone ボゾンの Chern-Simons 相互作用 一般に、大域的なカイラル変換

$$e^{i\alpha\gamma_5 t} \quad (2.4.1)$$

に対して、アノーマリーのため、分配関数は経路積分測度の変換より

$$Z \rightarrow \int [d\psi][d\bar{\psi}] \exp \left[iS + i \int d^4x \alpha \mathcal{P}(x) \right] \quad (2.4.2)$$

と変換。ここで

$$\mathcal{P}(x) = \frac{g^2}{8\pi^2} F_{\mu\nu}^a \tilde{F}_{\mu\nu}^b \text{Tr}(t_a t_b). \quad (2.4.3)$$

この変換に対する（擬）Goldstone ボゾンを B とすると、

$$\langle \text{Vac} | J_5^0(x) | B \rangle = -\frac{i}{2} F e^{ip_B \cdot x} \quad (2.4.4)$$

より、

$$-i \langle \text{Vac} | [Q_5, B(x)] | \text{Vac} \rangle = -2\text{Im} \int \frac{d^3p_B}{(2\pi)^3} \int d^3y \langle \text{Vac} | J_5^0(y) | B \rangle e^{-ip_B \cdot x} = F. \quad (2.4.5)$$

よって、

$$\delta \langle B \rangle = -i\alpha \langle [Q_5, B] \rangle = \alpha F. \quad (2.4.6)$$

したがって、アノーマリーは、次のような有効相互作用 (Chern-Simons 相互作用) を生み出す：

$$S_{\text{eff}} = S + \int d^4x \frac{1}{F} B \mathcal{P}(x). \quad (2.4.7)$$

π^0 への応用 π^0 をカイラル変換 $\exp(i\alpha\gamma_5\tau_3)$ ($\tau_3 = \sigma_3 = 2t_3$) に対する擬 Goldstone ボゾンと見なして, 以上の議論を適用すると, カイラルアノマーは次のような π^0 と電磁場の有効相互作用を生み出す:

$$\delta\mathcal{L} = \frac{1}{F_\pi}\pi^0\frac{e^2}{8\pi^2}F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu} \times N_c \left(\left(\frac{2}{3}\right)^2 - \left(\frac{1}{3}\right)^2 \right) = \frac{e^2N_c}{24\pi^2F_\pi}\pi^0F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu}. \quad (2.4.8)$$

この有効相互作用による π^0 崩壊率は

$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow 2\gamma) = \frac{N_c^2\alpha^2m_\pi^3}{144\pi^3F_\pi^2} = \left(\frac{N_c}{3}\right)^2 \times 1.11 \cdot 10^{16}\text{s}^{-1}. \quad (2.4.9)$$

これは $N_c = 3$ に対して, 実験値を良く再現する:

$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow 2\gamma)_{\text{exp}} = (1.19 \pm 0.08) \cdot 10^{16}\text{s}^{-1}. \quad (2.4.10)$$

2.4.2 インスタントンと $U(1)_A$ 問題の解決

ゲージ場の Pontrjagin 数 クォークのカイラル変換はアノマーにより見かけ上破れている:

$$e^{i\alpha\gamma_5 t} \mapsto \delta\mathcal{L} = \alpha\mathcal{P}(x); \quad \mathcal{P}d^4x = -\sum_j \frac{1}{4\pi^2} \text{Tr}(t\mathcal{F}^{(j)} \wedge \mathcal{F}^{(j)}). \quad (2.4.11)$$

($\mathcal{A} = -igA_\mu^a t_a dx^\mu$, $\mathcal{F} = d\mathcal{A} + \mathcal{A} \wedge \mathcal{A}$). しかし, カイラル変換がゲージ変換と可換のとき, $\mathcal{P}(x)$ は

$$\mathcal{P}(x)d^4x = d\mathcal{K}; \quad \mathcal{K} = -\sum_j q_j \frac{1}{4\pi^2} \text{Tr} \left(d\mathcal{A} \wedge \mathcal{A} + \frac{2}{3} \mathcal{A} \wedge \mathcal{A} \wedge \mathcal{A} \right)^{(j)} \quad (2.4.12)$$

と書けるので, この項の作用積分への影響は無いように見える.

しかし, 実はそうではない. 一般に,

$$\int_{\mathbb{R}^3} d\mathcal{K} = \int_{S_\infty^3} \mathcal{K} \quad (2.4.13)$$

となるが, 無限遠でゲージ場の強度 F がゼロに近づくとしても, 右辺がゼロとは限らない. 実際, G をゲージ群として

$$A \rightarrow U^{-1}dU, \quad U: S^3 \rightarrow G \quad (2.4.14)$$

とすると,

$$\int_{S_\infty^3} \mathcal{K} = \sum_j \frac{q_j}{12\pi^2} \int_{S^3} \text{Tr}(U^{-1}dU \wedge U^{-1}dU \wedge U^{-1}dU)^{(j)} \quad (2.4.15)$$

この右辺の被積分関数は、 G の不変体積要素から誘導される3次元体積要素と一致するので、その積分は、 G 内での S^3 の像のこの測度に関する体積 V を表す。この体積は、 U の連続変形では代わらない。実際、

$$\delta(U^{-1}dU) = d(U^{-1}\delta U) + [U^{-1}dU, U^{-1}\delta U] \quad (2.4.16)$$

より、

$$\begin{aligned} \delta V &= 3 \int_{S^3} \text{Tr} \{d(U^{-1}\delta U) \wedge U^{-1}dU \wedge U^{-1}dU\} \\ &= -3 \int_{S^3} \text{Tr} \{U^{-1}\delta U \wedge d(U^{-1}dU \wedge U^{-1}dU)\} = 0. \end{aligned} \quad (2.4.17)$$

したがって、この積分値は離散的な値を取る位相不変量となる (*winding number*)。値を計算するために、まず、

$$\pi_3(\text{SU}(n)) = \mathbb{Z}, \quad n \geq 2 \quad (2.4.18)$$

となることに注意する。これより、 $\text{SU}(2) \subset \text{SU}(n)$ ($n \geq 2$) を考慮すると、 $G = \text{SU}(2)$ の場合に計算すれば良いことがわかる。そこで、写像 U を

$$U : S^3 \rightarrow \text{SU}(2), \quad (2.4.19)$$

$$U(x) = \frac{1}{r} (x^4 \sigma_0 + ix^j \sigma_j) \quad (2.4.20)$$

とおくと、

$$U^{-1}dU = i\omega^j \sigma_j, \quad (2.4.21)$$

$$\omega^j = \frac{1}{r^2} (\epsilon_{jkl} x^k dx^l + x^4 dx^j - x^j dx^4) \quad (2.4.22)$$

より、

$$\begin{aligned} V &= i^3 \int_{S^3} \omega^j \wedge \omega^k \wedge \omega^l \text{Tr}(\sigma_j \sigma_k \sigma_l) \\ &= 12 \int_{S^3} \omega^1 \wedge \omega^2 \wedge \omega^3 \end{aligned} \quad (2.4.23)$$

を得る。ここで、 $\text{SU}(2)$ の $U(x)$ への左作用は、 S^3 の推移的な等長変換を与え、 $U^{-1}dU$ はこの作用で不変となるので、 ω^j は S^3 上の不変1形式となる。ところが、 S^3 の北極 $(0, 0, 0, 1)$ で

$$\omega^j = dx^j \quad (2.4.24)$$

となるので、 $\omega^1 \wedge \omega^2 \wedge \omega^3$ は S^3 の標準体積要素と一致する。よって、

$$V = 24\pi^2. \quad (2.4.25)$$

すなわち、 \mathcal{H} の積分は整数 (の2倍) となる。元のゲージ場で表すと、 $F_{\mu\nu}$ が無限遠でゼロに近づくとき、

$$p_1 = -\frac{1}{8\pi^2} \int d^4x \text{Tr}(\mathcal{F} \wedge \mathcal{F}) \in \mathbb{Z} \quad (2.4.26)$$

となる。ただし、 Tr はベクトル表現に関するものである。

インスタントン解 Pontrjagin 数がゼロでないゲージ配位は次のようにして構成することができる。時間を虚時間に変え，時空をユークリッド化して考える。このとき，任意の2形式 $\mathcal{F} \in A^2$ に対し，

$$**\mathcal{F} = \mathcal{F} \quad (2.4.27)$$

が成り立つので，2形式の空間は*の固有空間に直和分解される：

$$A^2 = A_+^2 + A_-^2 : \quad *\mathcal{F} = \pm\mathcal{F} \text{ for } \mathcal{F} \in A_{\pm}^2. \quad (2.4.28)$$

このとき， $\mathcal{F} \in A_{\pm}^2$ に対して，ゲージ場の方程式は，

$$D\mathcal{F} := d\mathcal{F} + \mathcal{A} \wedge \mathcal{F} - \mathcal{F} \wedge \mathcal{A} = 0 \Leftrightarrow D*\mathcal{F} = 0 \quad (2.4.29)$$

に帰着する。さらに，

$$d^4x \frac{1}{2} \mathcal{F}_{\mu\nu} \mathcal{F}^{\mu\nu} = *\mathcal{F} \wedge \mathcal{F} = \mathcal{F} \wedge \mathcal{F} \quad (2.4.30)$$

より， $\mathcal{F} \neq 0$ ならば，

$$\int d^4x \mathcal{F} \wedge \mathcal{F} \neq 0 \quad (2.4.31)$$

となる。このような解は，インスタントン解と呼ばれる。

SU(2) ゲージ理論での $p_1 = 1$ のインスタントン解は次のように構成することができる [Belavin AA, Polyakov AM, Schwarz AS, Tyupkin YuS (1975)]. ゲージ配位が，上記の $U(x) \in \text{SU}(2)$ を用いて

$$\mathcal{A} = f(r)U^{-1}dU \quad (2.4.32)$$

と書けるとする。ただし，

$$f(r) = O(r^2) \text{ at } r = 0, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} f(r) = 0. \quad (2.4.33)$$

このとき，

$$\begin{aligned} \mathcal{F} &= f'dr \wedge U^{-1}dU + f(f-1)U^{-1}dU \wedge U^{-1}dU \\ &= i \left\{ f'r \wedge \omega^j + f(1-f)\epsilon_{jkl}\omega^k \wedge \omega^l \right\} \sigma_j \end{aligned} \quad (2.4.34)$$

構成法より自動的に $D\mathcal{F} = 0$ なので， $*\mathcal{F} = \mathcal{F}$ が満たされればよい。 $dr, r\omega^j (j = 1, 2, 3)$ が正規直交系となるので，

$$*dr \wedge \omega^j = \frac{r}{2} \epsilon_{jkl} \omega^k \wedge \omega^l \quad (2.4.35)$$

これより，

$$*\mathcal{F} = i \left\{ \frac{f'}{2} \epsilon_{jkl} \omega^k \wedge \omega^l + 2f(1-f) \frac{1}{r} dr \wedge \omega^j \right\} \sigma_j. \quad (2.4.36)$$

よって、自己双対性条件は

$$rf' = 2f(1 - f). \quad (2.4.37)$$

この一般解は、 R を積分定数として

$$f = \frac{r^2}{r^2 + R^2}. \quad (2.4.38)$$

で与えられる.

$SU(2)_A$ のアノマリー $t \in SU(2)_A$ とすると、 $\text{Tr}(tt_{(a}t_b))$ は t_a, t_b が $U(1)_Y, SU(2), SU(3)$ のいずれに属する場合もゼロとなる. 唯一、 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ のところで見たように、 $t_a, t_b \in U(1)_{EM}$ のみが $SU(2)_A$ に対してアノマリーを生む (mixed anomaly). しかし、 $\pi_3(U(1)) = 0$ なので、 $U(1)$ はインスタントン解を持たず、アノマリーは対称性を破らない.

$U(1)_A$ のアノマリー 一方、 $U(1)_A$ の変換に対しては、 $\text{Tr}(tt_{(a}t_b)) \propto \text{Tr}(t_a t_b)$ なので、 $U(1), SU(2), SU(3)$ のすべてのゲージ場がアノマリーを生む. したがって、カイラル対称性 $U(1)_A$ はインスタントン効果で破れる. これにより、 $U(1)_A$ 問題は解決される.

§2.5

QCD 真空と QCD CP 問題

2.5.1 θ 真空

QCD において、真空基底状態での $SU(3)$ ゲージ場は、

$$\mathcal{F}_{\mu\nu} = 0 \Rightarrow \mathcal{A} = U^{-1}dU, \quad U(x) \in SU(3) \quad (2.5.1)$$

と表される. いま、空間的無限遠で $U \rightarrow 1$ を要請すると、各時刻 t でのゲージ場配位は、

$$U : S^3 \rightarrow SU(3) \quad (2.5.2)$$

と見なすことができる. これらのうち、互いに連続変形で移れるものは同一視すると、配位は U のホモトピー類で分類され、その全体は $\pi_3(SU(3)) \cong \mathbb{Z}$ と対応する. 具体的には、この対応は、巻き付き数

$$\begin{aligned} n &:= -\frac{1}{8\pi^2} \int d^3x \text{Tr} \left\{ d\mathcal{A} \wedge \mathcal{A} + \frac{2}{3} \mathcal{A} \wedge \mathcal{A} \wedge \mathcal{A} \right\} \\ &= \frac{1}{24\pi^2} \int_{\mathbb{R}^3} d^3x \text{Tr}(U^{-1}dU \wedge U^{-1}dU \wedge U^{-1}dU) \in \mathbb{Z} \end{aligned} \quad (2.5.3)$$

で与えられる.

巻き付き数の時間変化は,

$$\Delta n = n(t = \infty) - n(t = -\infty) = \int_{\mathbb{R}^4} d\mathcal{K} = \int_{\mathbb{R}^4} -\frac{1}{8\pi^2} \text{Tr}(\mathcal{F} \wedge \mathcal{F}). \quad (2.5.4)$$

これより, インスタントンは巻き付き数の変化を引き起こす. いま, 巻き付き数 n の真空を $|n\rangle$ と表すと,

$${}_+\langle n+q|n, t\rangle_- = C \int [dA]_q \cdots e^{-S_E} = A_q. \quad (2.5.5)$$

よって, 新たな真空の基底 $|\theta\rangle$ を

$$|\theta\rangle = \sum_{n \in \mathbb{Z}} e^{-in\theta} |n\rangle, \quad (0 \leq \theta \leq 2\pi) \quad (2.5.6)$$

により定義すると,

$${}_+\langle \theta'|\theta\rangle_- = 2\pi\delta(\theta - \theta') \sum_{q \in \mathbb{Z}} A_q e^{i\theta q}. \quad (2.5.7)$$

したがって, この θ 真空がエネルギー固有状態を与える.

2.5.2 強い相互作用における CP の破れ

各 θ 真空での Lagrangian は

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = \mathcal{L} + \theta \mathcal{P}^{(3)}; \quad (2.5.8)$$

$$\mathcal{P}^{(3)} = -\frac{1}{8\pi^2} \text{Tr}(\mathcal{F}^{(3)} \wedge \mathcal{F}^{(3)}) = \frac{g_3^2}{32\pi^2} \epsilon^{\mu\nu\lambda\sigma} \text{Tr}(F_{\mu\nu} F_{\lambda\sigma}). \quad (2.5.9)$$

と表される. この θ に依存する補正項は $\theta \neq 0$ のとき, CP を破る.

Chiral anomaly のため, この θ に依存した CP の破れとクォーク質量項の複素位相による CP の破れは密接に関連する. 以下, $q = (u, d, s)$ の 3 クォークモデルで考える. このとき, $U(3)_R \times U(3)_L$ 対称性のうち, $U(1)_b$ は厳密な対称性, $SU(3)_R \times SU(3)_L = SU(3)_V \times SU(3)_A$ 対称性はクォーク質量項により弱く破れた近似的対称性となる. ただし, $SU(3)_A$ はクォーク凝縮により自発的に破れる. また, 残る $U(1)_A$ は chiral anomaly で破れる. $it\gamma_5$ を対応する無限小カイラル変換とすると, アノマリー関数は, 一般に

$$\begin{aligned} \mathcal{P} &= \frac{g_1^2}{4 \cdot 8\pi^2} \text{Tr}(tY^2) F^{(1)} \cdot \tilde{F}^{(1)} + \frac{g_1 g_2}{2 \cdot 4\pi^2} \text{Tr}(tY t_a^{(2)}) F^{(1)} \cdot \tilde{F}^{(2)a} \\ &+ \frac{1}{8\pi^2} \text{Tr}(t) \left(g_2^2 F^{(2)} \cdot \tilde{F}^{(2)} + g_3^2 F^{(3)} \cdot \tilde{F}^{(3)} \right). \end{aligned} \quad (2.5.10)$$

ここで, 2 形式の内積において, $F \cdot G = F_{\mu\nu} G^{\mu\nu}/2$. また, 次の規格化を採用:

$$\text{Tr}(t_a^{(2)} t_b^{(2)}) = \delta_{ab}, \quad \text{Tr}(t_\alpha^{(3)} t_\beta^{(3)}) = \delta_{\alpha\beta}. \quad (2.5.11)$$

これより, $\text{Tr}(t) \neq 0$ となるカイラル変換 $U = \exp(i\alpha t \gamma_5)$ に対して, θ パラメータは

$$\theta \frac{g_3^2}{8\pi^2} F^{(3)} \cdot \tilde{F}^{(3)} \rightarrow (\theta + \alpha \text{Tr}(t)) \frac{g_3^2}{8\pi^2} F^{(3)} \cdot \tilde{F}^{(3)} \quad (2.5.12)$$

と変化する. 一方, クォークの質量行列は

$$\bar{q}_L \mathcal{M} q_R + \text{h.c.} \rightarrow \bar{q}_L e^{i\alpha t} \mathcal{M} e^{i\alpha t} q_R + \text{h.c.} \quad (2.5.13)$$

と変換する. これより, \mathcal{M} の全位相は

$$\det \mathcal{M} \rightarrow e^{i\alpha \text{Tr}(t)} \det \mathcal{M} \quad (2.5.14)$$

と変化する. よって, 最初, この変換で $\det \mathcal{M} \in \mathbb{R}$ としておき, そのときの θ を θ_0 とおく. このとき, $\text{SU}(3)_R \times \text{SU}(3)_L$ 変換で \mathcal{M} を非負固有値 $[m_u, m_d, m_s]$ をもつ実対角行列に対角化できる. この表示から出発して, カイラル変換 $U = \exp(i\alpha t \gamma_5)$ を施して, $\theta \rightarrow 0$ とすると,

$$0 = \theta_0 + \alpha \text{Tr}(t) = 0. \quad (2.5.15)$$

このとき, クォークの質量行列は

$$\mathcal{M} = e^{i\alpha t} [m_u, m_d, m_s] e^{i\alpha t}. \quad (2.5.16)$$

$|\theta_0| \ll 1$ とすると,

$$\mathcal{M} \simeq [m_u, m_d, m_s] + i\alpha \{t, [m_u, m_d, m_s]\}. \quad (2.5.17)$$

この第2項が CP の破れを生む:

$$\mathcal{L}_{\text{CPV}} = i\alpha \bar{q}(t\mathcal{M}_0 + \mathcal{M}_0 t)\gamma_5 q. \quad (2.5.18)$$

この CP の破れの量子効果を考える際に, \mathcal{L}_{CPV} がカイラル $\text{SU}(3)$ の擬 Goldstone bosons B_a に対応する成分をもつと, 量子効果は真空の再定義 ($\langle \bar{q}\lambda_a q \rangle, \langle \bar{q}\lambda_a \gamma_5 q \rangle$ の値の変化) を生み出す. これを避けるには, \mathcal{L}_{CPB} がカイラル $\text{SU}(3)$ に関する真空整列条件

$$\delta_\alpha \mathcal{L}_{\text{CPV}} = \alpha \bar{q} \left[\frac{1}{2} \lambda_\alpha, t\mathcal{M}_0 + \mathcal{M}_0 t \right] q = 0 \quad (\alpha = 1, \dots, 8) \quad (2.5.19)$$

を満たせば良い. 解は,

$$t\mathcal{M}_0 + \mathcal{M}_0 t = cI_3 \Leftrightarrow t = \frac{c}{2} \mathcal{M}_0^{-1}. \quad (2.5.20)$$

よって, 条件 (2.5.15) を考慮して,

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{CPV}} &= -i \frac{\theta_0}{\text{Tr} \mathcal{M}_0^{-1}} \bar{q} \gamma_5 q \\ &= -i\theta_0 \frac{m_u m_d m_s}{m_u m_d + m_d m_s + m_u m_s} (\bar{u} \gamma_5 u + \bar{d} \gamma_5 d + \bar{s} \gamma_5 s). \end{aligned} \quad (2.5.21)$$

2.5.3 中性子電気双極子モーメント

References

- Baluni V: "CP-nonconservation effects in quantum chromodynamics", PRD19 (1979)19.
- Crewther RJ, Di Vecchia P, Veneziano G, Witten E: "Chiral estimate of the electric dipole moment of the neutron in quantum chromodynamics", PLB88 (1979) 123.

双極子モーメントの計算法 一般に、フェルミ粒子に対して、

$$u(p) = \begin{pmatrix} (E - \mathbf{p} \cdot \boldsymbol{\sigma})\chi \\ m\chi \end{pmatrix}, \quad (2.5.22a)$$

$$u(p')^\dagger \gamma^j u(p) = m \{ i(E' - E)\delta_l^j - \epsilon_{jkl}(p' + p)^k \} \chi^\dagger \sigma^l \chi - imq_j \chi^\dagger \chi, \quad (2.5.22b)$$

$$\bar{u}(p') \gamma^{jk} u(p) = m\epsilon^{jkl} \{ (E' + E)\delta_l^n + i\epsilon_{lkn}q^k \} \chi^\dagger \sigma_n \chi + m\epsilon^{jkl}(p' + p)_l \chi^\dagger \chi \quad (2.5.22c)$$

より ($q = p' - p$)、

$$-i\bar{u}(p') \gamma_{\mu\nu} q^\nu u(p) A^\mu(q) = \frac{1}{2} \bar{u}(p') \gamma_{\mu\nu} u(p) F^{\mu\nu}(q) \rightarrow \sigma_j B^j.$$

よって、このフェルミ粒子の磁気モーメントを

$$\mu^j = \mu \sigma^j \quad (2.5.23)$$

と置くと、

$$\langle p' | T(j_\mu(0) e^{iS_{\text{int}}}) | p \rangle \rightarrow i\mu \bar{u}(p') \gamma_{\mu\nu} q^\nu u(p) + \dots \quad (2.5.24)$$

例えば、

$$e\bar{u}(p') \gamma_\mu u(p) = i\frac{e}{2m} \bar{u}(p') [(p + p')_\mu + \gamma_{\mu\nu} q^\nu] u(p) \quad (2.5.25)$$

より、自由荷電粒子の磁気モーメントは

$$\mu^j = \frac{e}{2m} \sigma^j. \quad (2.5.26)$$

同様にして、

$$\gamma_{\mu\nu} \gamma_5 = i\frac{1}{2} \epsilon_{\mu\nu\lambda\sigma} \gamma^{\lambda\sigma} \quad (2.5.27)$$

より、

$$-\bar{u}(p') \gamma_{\mu\nu} \gamma_5 q^\nu u(p) A^\mu(q) = \frac{1}{2} \bar{u}(p') \gamma_{\mu\nu} u(p) \tilde{F}^{\mu\nu}(q) \rightarrow \sigma_j E^j$$

よって、フェルミ粒子が電気双極子モーメント

$$D^j = D\sigma^j \quad (2.5.28)$$

をもつとすると、

$$\langle p' | T(j_\mu(0)e^{iS_{\text{int}}}) | p \rangle \rightarrow D\bar{u}(p')\gamma_{\mu\nu}q^\nu\gamma_5u(p) + \dots \quad (2.5.29)$$

中性子の電気双極子モーメント 一般論より、中性子の電気双極子モーメント D_n は

$$-\langle n(p') | T(J_\mu(0) \int d^4xi\mathcal{L}_{\text{CPV}}) | n(p) \rangle \rightarrow D_n\bar{u}(p')\gamma_{\mu\nu}q^\nu\gamma_5u(p) + \dots \quad (2.5.30)$$

により決定される。Crewther らの結果は、

$$D_n \simeq g_{\pi NN}\bar{g}_{\pi NN}\frac{1}{4\pi^2m_N}\ln\left(\frac{m_N}{m_\pi}\right). \quad (2.5.31)$$

ここで、

$$\mathcal{L}_{\pi NN} = \boldsymbol{\pi} \cdot \bar{N}\boldsymbol{\tau}(i\gamma_5g_{\pi NN} + \bar{\gamma}_{\pi NN})N, \quad (2.5.32a)$$

$$g_{\pi NN} \simeq 13.4, \quad (2.5.32b)$$

$$\bar{g}_{\pi NN} \simeq -\theta_0\frac{(m_\Xi - m_N)m_um_d}{F_\pi(m_u + m_d)(2m_s - m_u - m_d)}, \quad (2.5.32c)$$

$$\simeq -0.038\theta_0. \quad (2.5.32d)$$

よって、

$$D_n \simeq 5.2 \times 10^{-16}\theta_0\text{ecm}. \quad (2.5.33)$$

Bag モデルによる Baluni の結果も近い値となる:

$$D_n \simeq 2.7 \times 10^{-16}\theta_0\text{ecm}. \quad (2.5.34)$$

実験により得られた上限値は

$$|D_n| < 3 \times 10^{-26}\text{ecm} \Rightarrow |\theta_0| \lesssim 10^{-9}. \quad (2.5.35)$$

§2.6

QCD Axion

References

- Peccei RD, Quinn HR: "CP conservation in the presence of instantons", PRL38(1977)1791.
- ibid: "Constraints imposed by CP conservation in the presence of instantons", PRD16(1977)1440.
- Weinberg S: "A new light boson?", PRL40 (1978) 223.
- Wilczek F: "Problem of strong P and T invariance in the presence of instantons", PRL40 (1978)279.

2.6.1 Instanton vacuum energy

カイラル U(1) 変換でフェルミ粒子の質量行列の全体として位相をすべて θ パラメータに移したときの θ の値を θ_0 とする:

$$\det \mathcal{M} \in \mathbb{R}. \quad (2.6.1)$$

このとき, $p_1 = 1$ となる単インスタントンに対して,

$$-\int d^4x \frac{1}{2g^2} \mathcal{F}^a \cdot \mathcal{F}^a = -\int \frac{1}{2g^2} \mathcal{F}^a \wedge \mathcal{F}^a = \frac{8\pi^2}{g^2} \quad (2.6.2)$$

より, dilute gas 近似のもとで, Euclidean 経路積分 Z へのインスタントンの寄与は,

$$\begin{aligned} Z &= \int [dA] \dots e^{i\theta_0 \mathcal{P}(A) - S_E(A) - \dots} \\ &\simeq \sum_{p,q=0}^{\infty} \frac{1}{p!} \left(\int d^4x \Lambda^4 e^{i\theta_0 - 8\pi^2/g^2} \right)^p \frac{1}{q!} \left(\int d^4x \Lambda^4 e^{-i\theta_0 - 8\pi^2/g^2} \right)^q \times Z_0 \\ &= Z_0 \exp \left[\int d^4x 2\Lambda^4 e^{-8\pi^2/g^2} \cos \theta_0 \right]. \end{aligned} \quad (2.6.3)$$

これより, インスタントン効果は θ_0 に依存した真空エネルギーを生み出す:

$$V_{\text{inst}} \simeq -2\Lambda^4 e^{-8\pi^2/g^2} \cos \theta_0. \quad (2.6.4)$$

ただし, weak coupling phase ($g \ll 1$) ではこのポテンシャルの値は無視できるほど小さい!

$(2, 1)_{-1}$	$(1, 1)_{-2}$	$(2, 3)_{1/3}$	$(1, 3)_{4/3}$	$(1, 3)_{-2/3}$
$(\nu_e, e)_L$	e_R	$(u, d)_L$	u_R	d_R
$(\nu_\mu, \mu)_L$	μ_R	$(c, s)_L$	c_R	s_R
$(\nu_\tau, \tau)_L$	τ_R	$(t, b)_L$	t_R	b_R
L_L^i	ℓ_R^i	Q_L^i	u_R^i	d_R^i

表 2.1: 素粒子標準モデルでの各フェルミ粒子の量子数

2.6.2 Peccei-Quinn 対称性

素粒子標準モデルを2つの Higgs を含む形に拡張する：

$$\mathcal{L}_Y = \Gamma_{ij}^u \bar{Q}_{Li} \Phi_1 u_{Rj} + \Gamma_{ij}^d \bar{Q}_{Li} \Phi_2 d_{Rj} + \Gamma_{ij}^\ell \bar{L}_{Li} \Phi_2 \ell_{Rj} + \text{h.c.} \quad (2.6.5)$$

この系が、次のカイラル U(1) 変換 (Peccei-Quinn 対称性)

$$\Phi_1 \rightarrow e^{i\alpha x_1} \Phi_1, \quad \Phi_2 \rightarrow e^{i\alpha x_1} \Phi_2, \quad (2.6.6a)$$

$$u_{Rj} \rightarrow e^{-i\alpha y_1} u_{Rj}, \quad d_{Rj} \rightarrow e^{-i\alpha y_2} d_{Rj}, \quad \ell_{Rj} \rightarrow e^{-i\alpha y_3} \ell_{Rj}, \quad (2.6.6b)$$

$$Q_{Li} \rightarrow e^{i\alpha z_1} Q_{Li}, \quad L_{Li} \rightarrow e^{i\alpha z_2} L_{Li} \quad (2.6.6c)$$

に対して古典的には不変となるとすると、

$$y_1 + z_1 = x_1, \quad y_2 + z_1 = x_2, \quad y_3 + z_2 = x_2 \quad (2.6.7)$$

となる。

このカイラル U(1) 変換が自発的に破れるとして、対応する Goldstone 場を ϕ とおく：

$$\Phi_1 = \frac{v_1}{\sqrt{2}} e^{i\phi x_1/v_F} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \Phi_2 = \frac{v_2}{\sqrt{2}} e^{i\phi x_2/v_F} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.6.8)$$

ただし、scaling $(x_i, \phi) \rightarrow (\lambda x_i, \phi/\lambda)$ で Φ_i は不変なので、この scaling を用いて

$$x_1 x_2 = 1 \Rightarrow x_1 = x, \quad x_2 = \pm 1/x \quad (2.6.9)$$

とできる。このとき、Higgs の運動項より

$$|\partial\Phi_1|^2 + |\partial\Phi_2|^2 = \frac{x_1^2 v_1^2 + x_2^2 v_2^2}{2v_F^2} (\partial\phi)^2. \quad (2.6.10)$$

となるので、 ϕ の運動項を標準的に規格化すると、

$$v_F^2 = x_1^2 v_1^2 + x_2^2 v_2^2 = x^2 v_1^2 + \frac{v_2^2}{x^2}. \quad (2.6.11)$$

この変換に対するカレントは,

$$\begin{aligned}
J_{\text{PQ}}^\mu &= -v_{\text{F}}\partial^\mu\phi + y_1 \sum_i \bar{u}_{iR}\gamma^\mu u_{iR} + y_2 \sum_i \bar{d}_{iR}\gamma^\mu d_{iR} + y_3 \sum_i \bar{\ell}_{iR}\gamma^\mu \ell_{iR} \\
&\quad - z_1 \sum_i \bar{Q}_{iL}\gamma^\mu Q_{iL} - z_2 \sum_i \bar{L}_{iL}\gamma^\mu L_{iL}.
\end{aligned} \tag{2.6.12}$$

この発散は

$$\begin{aligned}
\partial_\mu J_{\text{PQ}}^\mu &= -v_{\text{F}}\partial^2\phi + \mathcal{P} \\
&\quad + (y_1 - z_1) (\bar{u}_R \mathcal{M}_u^\dagger u_L + \bar{u}_L \mathcal{M}_u^\dagger u_R) \\
&\quad + (y_2 - z_1) (\bar{d}_R \mathcal{M}_d^\dagger d_L + \bar{d}_L \mathcal{M}_d^\dagger d_R) \\
&\quad + (y_3 - z_2) (\bar{\ell}_R \mathcal{M}_\ell^\dagger \ell_L + \bar{\ell}_L \mathcal{M}_\ell^\dagger \ell_R).
\end{aligned} \tag{2.6.13}$$

ここで, アノマリー \mathcal{P} は

$$\begin{aligned}
\mathcal{P} &= y_1 \frac{N_g}{8\pi^2} \left(g_3^2 F^{(3)} \cdot \tilde{F}^{(3)} + \frac{3}{4} g_1^2 Y_{uR}^2 F^{(1)} \cdot \tilde{F}^{(1)} \right) \\
&\quad + y_2 \frac{N_g}{8\pi^2} \left(g_3^2 F^{(3)} \cdot \tilde{F}^{(3)} + \frac{3}{4} g_1^2 Y_{dR}^2 F^{(1)} \cdot \tilde{F}^{(1)} \right) \\
&\quad + y_3 \frac{N_g}{32\pi^2} \left(g_1^2 Y_{\ell R}^2 F^{(1)} \cdot F^{(1)} \right) \\
&\quad + z_1 \frac{2N_g}{8\pi^2} \left(g_3^2 F^{(3)} \cdot F^{(3)} + \frac{3}{4} g_1^2 Y_{QL}^2 F^{(1)} \cdot F^{(1)} + g_2^2 F^{(2)} \cdot F^{(2)} \right) \\
&\quad + z_2 \frac{2N_g}{8\pi^2} \left(\frac{1}{4} g_1^2 Y_{LL}^2 F^{(1)} \cdot F^{(1)} + g_2^2 F^{(2)} \cdot F^{(2)} \right) \\
&= \frac{N_g}{8\pi^2} \left[(x_1 + x_2) g_3^2 F^{(3)} \cdot F^{(3)} + 2(z_1 + z_2) g_2^2 F^{(2)} \cdot F^{(2)} \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{4y_1}{3} + \frac{y_2}{3} + y_3 + \frac{z_1}{6} + \frac{z_2}{2} \right) g_1^2 F^{(1)} \cdot F^{(1)} \right].
\end{aligned} \tag{2.6.14}$$

以上より, Φ_j の $\exp(ix_j\phi/f_a)$ を PQ 変換により消し去ると, QCD セクターに対する次の有効作用が得られる:

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} - \frac{1}{2}(\partial\phi)^2 + \mathcal{L}_{\text{int}}[\partial\phi/f_a, \Psi] + \left(\theta_0 + \xi \frac{\phi}{f_a} \right) \frac{g_3^2}{8\pi^2} F^{(3)} \cdot F^{(3)}. \tag{2.6.15}$$

ここで,

$$f_a = v_{\text{F}}, \quad \xi = N_g(x_1 + x_2). \tag{2.6.16}$$

\mathcal{L}_{eff} の中の \mathcal{L}_{int} は

$$\Psi \rightarrow e^{iy\phi/f_a} \Psi : -i\bar{\Psi}\gamma \cdot \partial\Psi \rightarrow -i\bar{\Psi}\gamma \cdot \partial\Psi + \frac{y}{f_a} \partial_\mu\phi \bar{\Psi}\gamma^\mu\Psi \tag{2.6.17}$$

より生じる.

この有効ポテンシャルは、Peccei-Quinn 対称性のように、クォークにカイラルに作用する変換に対して理論が不変で、かつこの対称性が自発的に破れると、Goldstone ボゾンが θ 角に加わり、結果的に θ 角をダイナミカルにすることが分かる:

$$\theta = \theta_0 + \xi \frac{\phi}{f_a}. \quad (2.6.18)$$

インスタントンポテンシャル

$$V_{\text{inst}} \sim -\Lambda^4 e^{-8\pi^2/g^2} \cos \theta \quad (2.6.19)$$

を考慮すると、これは θ が $\theta = 0$ に自動調節されることを意味する。

2.6.3 Axion

アクシオンのポテンシャルは擬 Goldstone ボゾンに対する有効理論を用いると、次のように曖昧さ無く決定される。

まず、アクシオン場を

$$a = \phi + \theta_0 \frac{f_a}{\xi} \quad (2.6.20)$$

とおくと、クォーク質量項を実にした表示でのアクシオンの有効ポテンシャルは

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_a = & -\frac{1}{2}(\partial a)^2 + \frac{\xi}{8\pi^2} \frac{a}{f_a} F^j \cdot F^j \\ & + \frac{x_1}{2f_a} \partial_\mu a \bar{u} \gamma^\mu \gamma_5 u + \frac{x_2}{2f_a} \partial_\mu a \bar{d} \gamma^\mu \gamma_5 d. \end{aligned} \quad (2.6.21)$$

つぎに、カイラル変換

$$u \rightarrow e^{ip_1 \theta \gamma_5} u, \quad d \rightarrow e^{ip_2 \theta \gamma_5} d \quad (2.6.22)$$

を施すと、

$$\theta = \frac{\xi}{f_a} a \rightarrow (1 + 2p_1 + 2p_2)\theta, \quad (2.6.23a)$$

$$x_1 \rightarrow x_1 + 2\xi p_1, \quad (2.6.23b)$$

$$x_2 \rightarrow x_2 + 2\xi p_2 \quad (2.6.23c)$$

と変化する。そこで、

$$p_1 + p_2 = -\frac{1}{2} \quad (2.6.24)$$

と取ると、 $\theta = 0$ となるが、同時にクォーク質量項が a と結合する:

$$\mathcal{L}_m = im_a \bar{u} e^{2ip_1 a (\xi/f_a) \gamma_5} u + im_d \bar{d} e^{2ip_2 a (\xi/f_a) \gamma_5} d. \quad (2.6.25)$$

ここで、カイラル SU(2) が自発的に破れており、その擬 Goldstone ボゾンがパイ中間子であることを考慮する：

$$-i\langle\bar{u}u\rangle = -i\langle\bar{d}d\rangle = v_c \cos\left(\frac{2\pi^0}{F_\pi}\right), \quad (2.6.26a)$$

$$-i\langle\bar{u}\gamma_5 u\rangle = i\langle\bar{d}\gamma_5 d\rangle = -iv_c \sin\left(\frac{2\pi^0}{F_\pi}\right), \quad (2.6.26b)$$

$$\langle\bar{u}\gamma_\mu\gamma_5 u\rangle = -\langle\bar{d}\gamma_\mu\gamma_5 d\rangle = \frac{1}{2}F_\pi\partial_\mu\pi^0 \quad (2.6.26c)$$

このとき、 \mathcal{L}_m より

$$\langle\mathcal{L}_m\rangle = m_u v_c \cos\left(\frac{2\pi^0}{F_\pi} - \frac{2p_1\xi}{f_a}a\right) + m_d v_c \cos\left(\frac{2\pi^0}{F_\pi} + \frac{2p_2\xi}{f_a}a\right) \quad (2.6.27)$$

また、 a とクォークの結合項より、

$$\frac{x_1 + 2\xi p_1}{2f_a}\partial_\mu a\langle\bar{u}\gamma^\mu\gamma_5 u\rangle + \frac{x_2 + 2\xi p_2}{2f_a}\partial_\mu a\langle\bar{d}\gamma^\mu\gamma_5 d\rangle = \frac{F}{2f_a}\{x_1 - x_2 + 2\xi(p_1 - p_2)\}\partial a\cdot\partial\pi^0. \quad (2.6.28)$$

この運動項での $a - \pi^0$ 混合が消えることを要求すると

$$p_1 - p_2 = -\frac{1}{2\xi}(x_1 - x_2) \quad (2.6.29)$$

よって、

$$p_1 = -\frac{1}{4} - \frac{x_1 - x_2}{4\xi}, \quad p_2 = -\frac{1}{4} + \frac{x_1 - x_2}{4\xi}, \quad (2.6.30)$$

以上を総合すると、擬 Goldstone ボゾン系 (π^0, a) に対する有効 Lagrangian は

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = -\frac{1}{2}(\partial\pi^0)^2 - \frac{1}{2}(\partial a)^2 - V, \quad (2.6.31)$$

$$V = -m_u v_c \cos\left(\frac{2\pi^0}{F_\pi} - \frac{2p_1\xi}{f_a}a\right) - m_d v_c \cos\left(\frac{2\pi^0}{F_\pi} + \frac{2p_2\xi}{f_a}a\right) \quad (2.6.32)$$

ポテンシャル V を極点 $(\pi^0, a) = (0, 0)$ で展開すると、質量項は

$$V_m = \frac{4(m_u + m_d)v_c}{2F_\pi^2}(\pi^0)^2 - 4\frac{\xi(p_1 m_u - p_2 m_d)v_c}{F_\pi f_a}a\pi^0 + 2\frac{\xi^2(p_1^2 m_u + p_2^2 m_d)v_c}{f_a^2}a^2. \quad (2.6.33)$$

$f_a \gg F_\pi$ として対角化すると、

$$m_\pi^2 \simeq 4\frac{m_u + m_d}{F_\pi^2}v_c, \quad (2.6.34a)$$

$$m_a^2 \simeq \frac{m_u m_d}{m_u + m_d}v_c \left(\frac{\xi}{2f_a}\right)^2 = \left(\frac{\xi F_\pi}{2f_a}\right)^2 \frac{m_u m_d}{(m_u + m_d)^2}m_\pi^2. \quad (2.6.34b)$$

f_a が電弱スケールとすると,

$$f_a \sim 100\text{GeV} \Rightarrow m_a \gtrsim 0.3\text{MeV} \quad (2.6.35)$$

となるが, このような粒子は発見されていない.

また, Bardeen, Peccei, Yanagida[NPB279(1987)401] により, $f_a = v_F$ のとき,

$$\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ + a) \simeq 3 \times 10^{-5}(x + 1/x)^2 \quad (2.6.36)$$

が得られているが, これは KEK ので実験結果 [Asano Y et al:PLB107(1981)159]

$$rBR(K^+ \rightarrow \pi^+ + \text{nothing}) < 3.8 \times 10^{-8} \quad (2.6.37)$$

と矛盾する.

(注) 上の議論で, θ 変数の値をゼロにするため, PQ 変換と (u, d) セクターでの chiral 変換を組み合わせるという一見無駄な操作を行った理由は, axion 場のポテンシャルの問題を制御可能な (u, d) セクターに閉じ込めるためである.

§2.7

Invisible axion

一般に, PQ 変換のスカラー場系 $\{\Phi_p\}$ およびスピノール場系 $\{\Psi_j\}$ に対する作用は,

$$\Phi_p \rightarrow e^{ix_p\alpha}\Phi_p, \quad \Psi_j \rightarrow e^{iy_j\alpha\gamma_5}\Psi_j \quad (2.7.1)$$

これに対する Anomaly 関数は

$$\mathcal{P} = \sum_j y_j \sum_r q_{(r)j}^2 \frac{g_r^2}{8\pi^2} \text{Tr}_v(F^{(r)} \cdot \tilde{F}^{(r)}). \quad (2.7.2)$$

ただし, スピノール場系では Left 成分と Right 成分は独立な場として j でカウント.

いま, この対称性が自発的に破れるとし, その Goldstone boson を ϕ とおくと,

$$\Phi_p = e^{-ix_p\phi/f_a}(\Phi_p)_0, \quad |(\Phi_p)_0|^2 = v_p^2/2. \quad (2.7.3)$$

ここで, f_a は ϕ の運動項の規格化

$$\sum_p |\partial\Phi_p|^2 = \frac{1}{2f_a^2} \left(\sum_p v_p^2 x_p^2 \right) (\partial\phi)^2 = \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 \quad (2.7.4)$$

より,

$$f_a^2 = \sum_p x_p^2 v_p^2. \quad (2.7.5)$$

よって、 Φ_a の Goldstone boson 成分を PQ 変換

$$\alpha = \phi(x)/f_a \quad (2.7.6)$$

で消去すると,

$$\theta : \theta_0 \rightarrow \theta_0 + \xi \frac{\phi}{f_a} = \xi \frac{a}{f_a}, \quad (2.7.7a)$$

$$\mathcal{L}_a = -\frac{1}{2}(\partial a)^2 + a \frac{\xi}{f_a} \frac{g_3^2}{16\pi^2} F^{(3)} \cdot \tilde{F}^{(3)} + \sum_j \frac{y_j}{f_a} \partial_\mu a \bar{\Psi}_j \gamma^\mu \gamma_5 \Psi_j. \quad (2.7.7b)$$

ここで,

$$a = \phi + \frac{f_a}{\xi} \theta_0, \quad (2.7.8)$$

$$\xi = \sum_j y_j q_{(3)j}^2. \quad (2.7.9)$$

したがって、 f_a と ξ の定義を変更し、さらに,

$$x_1 \rightarrow y_{uR} + y_{uL}, \quad x_2 \rightarrow y_{dR} + y_{dL} \quad (2.7.10)$$

と置けば、前節の議論がそのまま使える。特に、axion 質量は

$$m_a = \frac{\xi F_\pi \sqrt{m_u m_d}}{2f_a m_u + m_d} m_\pi. \quad (2.7.11)$$

また、フェルミ粒子との結合は

$$\mathcal{L}_{af} = \sum_j \frac{y_j}{f_a} \partial_\mu a \bar{\Psi}_j \gamma^\mu \gamma_5 \Psi_j \quad (2.7.12)$$

ゲージ場との CS 結合は

$$\mathcal{L}_{CS} = \sum_r g_{CS}^{(r)} \frac{a}{f_a} \text{Tr}_v(F^{(r)} \cdot \tilde{F}^{(r)}), \quad (2.7.13)$$

$$g^{(r)} = \sum_j \frac{y_j q_{(r)j}^2 g_r^2}{8\pi^2}. \quad (2.7.14)$$

特に、電磁場との結合は

$$\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = \frac{g_{a\gamma\gamma}}{2} a F \cdot \tilde{F} = -g_{a\gamma\gamma} a \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}, \quad (2.7.15)$$

$$g_{a\gamma\gamma} = \frac{\alpha \xi}{2\pi f_a} \left(\frac{E}{N} - \frac{2(4m_u + m_d)}{3(m_u + m_d)} \right). \quad (2.7.16)$$

ここで,

$$\frac{E}{N} = \frac{\sum_j y_j q_{(EM)j}^2}{\sum_j y_j q_{(3)j}^2}. \quad (2.7.17)$$

以上より、PQ 変換の作用する Higgs 場を EW のものから、EW singlet なものに変えると、 f_a を大きくし、それによりアクシオン-クォークやアクシオン-ゲージ場の結合を弱くすることができる。この場合、実験との矛盾はなくなる。

$$m_a \propto 1/f_a, \quad g_{aqq}, g_{a\gamma\gamma} \propto 1/f_a. \quad (2.7.18)$$

f_a, x_p, y_i の定義の変更 多くの応用的文献では, 次の置き換えがされている:

$$f_a/\xi \rightarrow f_a, \quad x_p/\xi \rightarrow x_p, \quad y_j/\xi \rightarrow y_j. \quad (2.7.19)$$

この新たな記法では,

$$\sum_j y_j q_{(3)j}^2 = 1. \quad (2.7.20)$$

以下, 特に断らなければ, この notation に従う.

2.7.1 KSVZ 模型

Reference

- Kim JE: “Weak interaction singlet and strong CP invariance”, PRL43(1979)103.
- Shifman MA, Vainstein AI, Zakharov VI: “Can confinement ensure natural CP invariance of strong interactions?”, NPB166(1980)493.

模型の概要 このモデルでは, singlet スカラ σ と重いクォーク Q を導入する.

- σ : $f_a = \langle \sigma \rangle \gg v_F$
- Q : $M_Q \sim f_a$. PQ 電荷をもつ唯一のクォーク. $\xi = y_Q$.

このモデルでは, アクシオンは重いクォークとのみ相互作用する. 電磁場との CS 結合は, π^0 および η との混合を考慮して,

$$g_{a\gamma\gamma} = \frac{\alpha}{\pi f_a} \left(3e_Q^2 - \frac{4m_d + m_u}{3(m_u + m_d)} \right). \quad (2.7.21)$$

また,

$$m_a \simeq 6.3\text{eV} \left(\frac{10^6 \text{GeV}}{f_a} \right) / \quad (2.7.22)$$

2.7.2 DFSZ 模型

References

- Dine M, Fischer W, Srednicki M: “A simple solution to the strong CP problem with a harmless axion”, PLB104(1981)199.
- Zhitnitsky AR: “On possible suppression of the axion hadron interactions”, Sov. J. Nucl. Phys. 31 (1980)260.

模型の概要 PQ 模型に, $f_a = \langle \sigma \rangle \gg v_F$ となる PQ 電荷をもつスカラ場を追加.

このモデルでは, 追加されたスカラ場は f_a を大きくする役割だけを果たし, axion-quark 結合, axion-gauge CS 結合は PQ 模型と同じ.

電磁場との CS 結合は, π^0 および η との混合を考慮して,

$$g_{a\gamma\gamma} = \frac{\alpha}{\pi f_a} \left(\frac{4}{3} - \frac{4m_d + m_u}{3(m_u + m_d)} \right). \quad (2.7.23)$$

§2.8

さらなる一般化

一般に, 理論がカイラルな shift symmetry (または $U(1)$ symmetry) を持つとする.

- 対応する変換は一般に anomaly をもち, パラメータ θ の変換に対して,

$$\delta \mathcal{L}_{\text{eff}} = \theta \mathcal{P}; \quad \mathcal{P} = \sum \xi \frac{g^2}{8\pi^2} F \cdot \tilde{F} \quad (2.8.1)$$

と変換.

- この対称性が自発的に破れれば, Goldstone ボゾンとして擬スカラ場 ϕ が現れ, その運動項が標準的となる規格化のもとで,

$$\phi \rightarrow \phi + \theta f_a. \quad (2.8.2)$$

- この変換則より, $\mathcal{P} \neq 0$ なら, 有効相互作用としてゲージ場との Chern-Simons 型相互作用が生じる:

$$\mathcal{L}_{\text{CS}} = \frac{\phi}{f_a} \mathcal{P}. \quad (2.8.3)$$

- また, フェルミ場との相互作用は微分型となる:

$$\mathcal{L}_{\text{af}} = \sum_j \frac{y_j}{f_a} \partial_\mu \phi \bar{\Psi}_j \gamma^\mu \gamma_5 \Psi_j. \quad (2.8.4)$$

- 強結合となるゲージセクターが \mathcal{P} に含まれるときには, そのセクターでのカイラル対称性の破れにより, Goldstone ボゾンは非摂動的に質量 (ポテンシャル) を獲得し, 擬スカラの擬 Goldstone ボゾン (アクシオン) となる:

$$V = V_0 - \sum \Lambda_i^4 \cos \left(c_i \frac{\phi}{f_a} + \dots \right). \quad (2.8.5)$$

ここで, \dots はカイラル対称性の破れに伴う他の擬 Goldstone ボゾン (メソン) の寄与を表す.

以上より, axion のラグランジアンは次の普遍的な構造をもつ:

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_a &= -\frac{1}{2}(\nabla\phi)^2 - V(\phi) \\ &+ \sum \frac{y}{f_a} \partial_\mu \phi \bar{\Psi} \gamma^\mu \gamma_5 \Psi \\ &- \frac{\phi}{f_a} \sum \frac{g^2}{8\pi^2} \xi_{ab} \text{Tr}(F^a \cdot \tilde{F}^b) \\ &- \frac{\eta}{384\pi^2} R_{\mu\nu\lambda\sigma} \tilde{R}^{\mu\nu\lambda\sigma}.\end{aligned}\tag{2.8.6}$$

3

Axiverse

§3.1

超弦理論

超弦理論は、2次元時空上の超対称性をもつ共形不変な場の理論であり、そのボゾンの基礎場の数が D のとき、 D 次元時空内を運動する内部自由度をもったものの量子論となる。

基本要素

- 2次元 world sheet の位相：閉曲面（閉弦）vs 開局面（開弦）
- World sheet fields : $(X, \psi)_L + (X, \psi)_R$
- Target space : $(M^D; \{g, \phi, B_2\}, F/\{C_p\}; \text{spinor fields}) \Rightarrow$ WS CFT
- Branes: $(\Sigma^p; (F, \chi), (\text{Bulk fields})) \Rightarrow$ open WS BC \Rightarrow Brane action
- Closed WS BC: Ramond vs Neveu-Schwarz
- Projections: GSO, Orientifold

Outcome

- 粒子の質量, スピンのスペクトル
- 散乱行列
- Weyl 不変性 \Rightarrow バルク NS 場に対する場の方程式

- Anomaly free \Rightarrow RR 場の方程式, Brane の作用積分
- 低エネルギー極限の場の理論 = 超重力理論

得られないもの

- 一般の動的な時空 (+場) の振る舞い (物質励起の背景場への反作用)
- 宇宙定数 (への量子補正)
- コンパクト化や低エネルギー理論の選別

平坦な時空上の超弦理論の分類

- 閉弦のみの理論
 - I 型 (16 susy)
 - * ヘテロ型 $E_8 \times E_8 / \mathbb{Z}_2$ 理論 \Rightarrow 10次元 Type I sugra + $E_8 \times E_8$ -SYM
 - * ヘテロ型 SO(32) 理論 \Rightarrow 10次元 Type I sugra + SO(32)-SYM
 - II 型 (32 susy)
 - * IIA 型理論 \Rightarrow 10次元 type IIA sugra
 - * IIB 型理論 \Rightarrow 10次元 type IIB sugra
- 開弦+閉弦理論 (16 susy 以下)
 - IIA 型理論+ブレーン \Rightarrow 10次元 type II sugra + brane 上の (chiral)SYM
 - IIB 型理論+ブレーン \Rightarrow 10次元 type II sugra + brane 上の (chiral)SYM
 - I 型 SO(32) \Rightarrow IIB 型理論 + D_9 ブレーン
- M 理論 \Rightarrow 11次元 sugra

厳密に構成された非自明背景場・時空上の超弦理論

- Linear dilaton 理論
- PP GW 上の超弦理論
- 直積型 Calabi-Yau/Orbifold コンパクト化 (no flux)

	Heterotic (M)	IIA	IIB	M/F
Local SUSY	$N = 4(D = 10)$	$N = 8(D = 10)$	$N = 8(D = 10)$	$N = 8(D = 11/12)$
Gravity sector	Bulk $(g_{MN}, B_2, \phi, \Psi_M, \lambda)$	Bulk $(NS, \{C_{2p+1}\}, \Psi_M, \lambda, \Psi'_M, \lambda')$	Bulk $(NS, \{C_{2p}\}, \Psi_M^{(1)}, \lambda^{(1)}, \Psi_M^{(2)}, \lambda^{(2)})$	Bulk $(g_{MN}, C_3, \Psi + M)$
Geometric Compactif.	$T^6 \Rightarrow N = 4$ $T^6/\Gamma, CY^3 \Rightarrow N = 1$	$T^6 \Rightarrow N = 8$ $T^6/\Gamma, CY^3 \Rightarrow N = 2$	$T^6 \Rightarrow N = 8$ $T^6/\Gamma, CY^3 \Rightarrow N = 2$	$M/T^7 \Rightarrow N = 8$ $F/CY^4 \Rightarrow N = 1$
Matter sector	Bulk $(F_2 + \chi)$	IDBs $(F_2 + \chi) \Rightarrow N = 1$	IDBs/MDB $(F_2 + \chi) \Rightarrow N = 1$	A-D-E Singularities
Bulk Flux	$G = E^8 \times E^8, SO(32)$ Gauge bdl \Rightarrow GUT	$G = U(n)$'s +SO/Sp $F_0 \Rightarrow$ massive IIA	$G = U(n)$'s +SO/Sp	$G = U(n)$'s, E^8
Moduli Stabilisation	H-flux $\Rightarrow Y^6$: NK X (partially for complex moduli)	Flux $\Rightarrow Y^6$: NK Δ Flux+NP effect (nongeneric)	ISD 3-flux \Rightarrow complex moduli fixed \circ Flux + instanton / $\langle XX \rangle$	X
Susy breaking	???	???	\circ Kahler uplifting	???
Particle Ph.	\circ MSSMs \Leftarrow SU(5)/SO(10)/ E_6 GUTs No EW higgs!!	Δ MSSM-like models. No GUT. EW SB ?	Δ Direct MSSM by MDB/F-GUT.	X GUT only No realistic model.
Cosmology	X Higher-order???	X No dS vacua found !!	Δ anti-D3 or string corrections	X

表 3.1: 超弦理論・M 理論のコンパクト化 : Summary table

§3.2

10次元超重力理論

3.2.1 I型理論

基本場

- 重力セクター
 - ボーズ場
 - * 計量/フレーム場: g_{MN} (e_M^A)
 - * 2形式場: $B_2 \Rightarrow \tilde{H}_3$
 - * デイラトン: Φ
 - フェルミ場
 - * スピン 3/2 場: ψ_M
 - * デイラティーノ: λ
- ゲージセクター
 - ゲージ場: $A_1 \in \text{Ad}(G)$
 - ゲージノ: $\chi \in \text{Ad}(G)$

	Gravitational sector	Gauge sector
Boson	metric g_{MN} 2-form B_2 dilaton Φ	gauge field $A_1 \in \text{Ad}(G)$
Fermion	gravitino $\Psi_M(\mathbf{56})$ dilatio $\lambda(\mathbf{8})$	gaugino $\chi(\mathbf{8}) \in \text{Ad}(G)$

作用積分 ストリングフレームでの Bosonic part の作用積分は

$$S_{\text{Het},B} = \frac{1}{2\kappa_{10}^2} \int d^{10}x (-g)^{1/2} e^{-2\Phi} \left[R + 4(\partial\Phi)^2 - \frac{1}{2}|\tilde{H}_3|^2 - \frac{\alpha'}{4} \text{Tr}_v(|F_2|^2) \right]. \quad (3.2.1)$$

$$F_2 = dA_1 - iA_1 \wedge A_1, \quad (3.2.2)$$

$$\tilde{H} = dB - \frac{\alpha'}{4} (\omega_{\text{CS}}^G - \omega_{\text{CS}}^L). \quad (3.2.3)$$

ここで,

- α' : the inverse of the string tension
- $\omega_{\text{CS}}^{\text{G}}, \omega_{\text{CS}}^{\text{L}}$: Chern-Simons 接続係数 :

$$d\omega_{\text{CS}}^{\text{G}} = \text{Tr}(F \wedge F), \quad d\omega_{\text{CS}}^{\text{L}} = \text{tr}(\mathcal{R} \wedge \mathcal{R}). \quad (3.2.4)$$

一般に,

$$\omega_{\text{CS}} = \text{Tr}_v \left(A \wedge dA - \frac{2i}{3} A \wedge A \wedge A \right), \quad (3.2.5)$$

ゲージ不変性

$$\delta A = D\lambda \equiv d\lambda - i[A, \lambda], \quad (3.2.6a)$$

$$\delta\omega = D\Theta \equiv d\Theta + [\omega, \Theta], \quad (3.2.6b)$$

$$\delta B = d\sigma + (\alpha'/4) \{ \text{Tr}(\lambda dA) + \text{tr}(\Theta d\omega) \} \quad (3.2.6c)$$

ここで, σ は任意の 1 形式.

3.2.2 II 型理論

基本場

$$\text{IIA} : \left\{ g_{MN}, B_{[2]}, \phi, C_M^{(1)}, C_{MNP}^{(3)}, C_{M\dots P}^{(5)}, C_{M\dots P}^{(7)}, C_{M\dots P}^{(9)}, \psi_M, \lambda \right\}, \quad (3.2.7a)$$

$$\text{IIB} : \left\{ g_{MN}, B_{[2]}, \phi, C_M^{(0)}, C_{MNP}^{(2)}, C_{M\dots P}^{(4)}, C_{M\dots P}^{(6)}, C_{M\dots P}^{(8)}, \psi_M, \lambda \right\} \quad (3.2.7b)$$

ここで, IIA に対しては ψ_M, λ は右と左カイラリティの doublets, IIB に対しては条件

$$\Gamma_{11}\psi_M = \psi_M, \quad \Gamma_{11}\lambda = -\lambda \quad (3.2.8)$$

を満たす同じカイラリティの doublets. また, G^{2n} は on-shell で次の双対条件を満たす:

$$G^{(2n)} + \Psi^{(2n)} = (-1)^{[n]} *G^{(10-2n)}. \quad (3.2.9)$$

擬作用積分

$$S_B = \frac{1}{2\kappa_{10}^2} \int d^{10} \sqrt{-g} \left[e^{-2\phi} \left(R(\omega(e)) + 4d\phi \cdot d\phi - \frac{1}{2} H \cdot H \right) - \sum_{n \in S} \frac{1}{4} G^{(2n)} \cdot G^{(2n)} \right]. \quad (3.2.10)$$

ここで,

$$S = \begin{cases} (0, 1, \dots, 5); & IIA \\ (1/2, 3/2, \dots, 9/2); & IIB \end{cases} \quad (3.2.11)$$

また,

$$\mathbf{G} = \sum_{n \in S} \frac{1}{\ell_s^{2n-1}} G^{(2n)}, \quad \mathbf{C} = \sum_{n \in S} \frac{1}{\ell_s^{2n-1}} C^{(2n-1)} \quad (3.2.12)$$

として,

$$H = dB, \quad \mathbf{G} = d\mathbf{C} - \frac{1}{\ell_s^2} dB \wedge \mathbf{C} + \ell_s G^{(0)} e^{B/\ell_s^2}. \quad (3.2.13)$$

(この定義は, IIB の標準的なものに対応. IIA の標準的なものとは B の符号が異なる.)

§3.3

Gauge and gravitational anomaly

References

- Harvey JA: hep-th/0509097, “ TASI Lecture on Anomalies ”
- Adler SL: ”Anomalies” [arXiv:hep-th/0411038]
- Alvarez-Gaume L, Ginsparg P: Ann. Phys. 161:423-490 (1985), “ The Structure of Gauge and Gravitational Anomalies ”
- Alvarez-Gaume L, Witten E: NPB234:269-330 (1983), “ Gravitational anomalies ”
- Witten E: plb117(1982)324, “ SU(2) anomaly ”
Anomalous U(1) and GCS/GGS
- Anastasopoulos P, Bianchi M, Dudas E, Kiritsis E.: JHEP0611:057 (2006)
“ Anomalies, anomalous U(1) ’ s and generalized Chern-Simons terms ”

3.3.1 一般的構造

アノーマリーはカイラルな場の量子効果によってのみ生成され、 d 次元時空では、一般に次の構造をもつ：

$$\delta \ln Z = \frac{-i}{(2\pi)^5} \int \hat{I}^d(F_2, R_2), \quad (3.3.1)$$

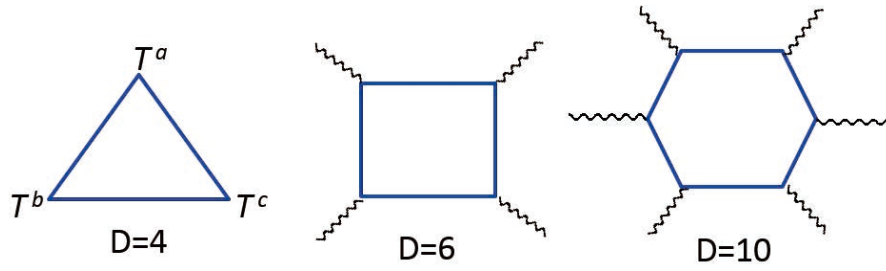
$$\hat{I}^{d+2} \Rightarrow \hat{I}^d : \quad \hat{I}^{d+2} = d\hat{I}^{d+1}, \quad \delta \hat{I}^{d+1} = d\hat{I}^d. \quad (3.3.2)$$

ゲージアノーマリー

- 4次元の Gauge anomaly は次の形にかける：

$$I^d = C\alpha^a \text{Tr}(t_a t_{(b} t_{c)}) \mathcal{F}^b \wedge \mathcal{F}^c. \quad (3.3.3)$$

- 自己共役表現（実表現，ないし擬実表現）はゲージアノーマリーを生まない。これは、このような表現に対しては、ゲージ不変性をもつ Pauli-Villars 型



counter term が作れるためである。

4次元の場合、これは直接示すことができる。まず、

$$\delta\psi_r = i\alpha^a t_a \psi_r, \quad \delta\psi_r^* = -i\alpha^a t_a^* \psi_r^* \quad (3.3.4)$$

で、 t_a はエルミートなので、自己共役表現に対しては、

$$t_a = S(-T_a)S^{-1}. \quad (3.3.5)$$

よって、

$$\text{Tr}(t_a t_b t_c) = -\text{Tr}(T_a T_b T_c) = -\text{Tr}(t_a t_b t_c). \quad (3.3.6)$$

- 4次元では、 $G = \text{SU}(2), \text{SO}(2n+1)(n \geq 2), \text{Sp}(2n)(n \geq 3), G_2, F_4, E_7, E_8$ のときゲージアノマリーは生じない。一方、 $G = \text{U}(1), \text{SU}(n)(n \geq 3), \text{SO}(4n+2), E_6$ はアノマリーを生じる可能性がある。これらは、 $\text{U}(1)$ を除くとすべて $\pi_5(G) \neq 0$ 。

重力アノマリー

- 理論の CPT 不変性と重力相互作用の P 不変性より、カイラルスピノール（およびカイラルテンソル）がローレンツ群の複素表現となっている場合には、必ずカイラリティが反対の項が作用積分に対して現れ、アノマリーはキャンセルする。このため、重力アノマリーは $D = 4k + 2$ 次元でのみ発生。
- 重力アノマリーは、 $D/2 + 1$ 個の外線をもつカイラルフェルミ粒子と自己共役テンソルにより生じる。

3.3.2 10次元超重重力理論

10次元超重重力理論に登場するカイラル場と対応する I^{12} は

- dilatino: $\mathbf{8}, \mathbf{8}'$

$$\begin{aligned} \hat{I}_{\mathbf{8}}(F_2, R_2) = & -\frac{\text{Tr}(F_2^6)}{1440} \\ & + \frac{\text{Tr}(F_2^4)\text{tr}(R_2^2)}{2304} - \frac{\text{Tr}(F_2^2)\text{tr}(R_2^4)}{23040} - \frac{\text{Tr}(F_2^2)[\text{tr}(R_2^2)]^2}{18432} \\ & + \dim(G) \left(\frac{\text{tr}(R_2^6)}{725760} + \frac{\text{tr}(R_2^4)\text{tr}(R_2^2)}{552960} + \frac{[\text{tr}(R_2^2)]^3}{1327104} \right). \end{aligned} \quad (3.3.7)$$

ここで, tr は $R_2 = (\mathcal{R}^a_b)$ の接空間添え字 a, b に関するトレース, Tr はフェルミ粒子のゲージ群 G の表現に関するトレース.

- gravitino: $\mathbf{56}, \mathbf{56}'$

$$\hat{I}_{\mathbf{56}}(R_2) = -495 \frac{\text{tr}(R_2^6)}{725760} + 225 \frac{\text{tr}(R_2^4)\text{tr}(R_2^2)}{552960} - 63 \frac{[\text{tr}(R_2^2)]^3}{1327104}. \quad (3.3.8)$$

- 5-form flux (IIB): $[5]_+, [5]_-$

$$\hat{I}_{\text{SD}}(R_2) = +992 \frac{\text{tr}(R_2^6)}{725760} - 448 \frac{\text{tr}(R_2^4)\text{tr}(R_2^2)}{552960} + 128 \frac{[\text{tr}(R_2^2)]^3}{1327104}. \quad (3.3.9)$$

II 型理論 IIA 型理論はカイラルでないので, アノマリーは自明にキャンセルする. また, IIB 型理論でも, アノマリーはキャンセルする:

$$\hat{I}_{\text{IIB}}(R_2) = -2\hat{I}_{\mathbf{8}}(R_2) + 2\hat{I}_{\mathbf{56}}(R_2) + \hat{I}_{\text{SD}}(R_2) = 0. \quad (3.3.10)$$

I 型理論 I 型理論のアノマリーは

$$\begin{aligned} \hat{I}_1 &= \hat{I}_{\mathbf{56}}(R_2) - \hat{I}_{\mathbf{8}}(R_2) + \hat{I}_{\mathbf{8}}(F_2, R_2) \\ &= \frac{Y_4 X_8}{768} + \frac{1}{1440} \left\{ -\text{Tr}_a(F_2^6) + \frac{1}{48} \text{Tr}_a(F_2^2) \text{Tr}_a(F_2^4) - \frac{1}{14400} [\text{Tr}_a(F_2^2)]^3 \right\} \\ &\quad + (\dim(G) - 496) \left\{ \frac{\text{tr}(R_2^6)}{725760} + \frac{\text{tr}(R_2^4)\text{tr}(R_2^2)}{552960} + \frac{[\text{tr}(R_2^2)]^3}{1327104} \right\} \end{aligned} \quad (3.3.11)$$

ここで,

$$Y_4 = \text{tr}(R_2^2) - \frac{1}{30} \text{Tr}_a(F_2^2), \quad (3.3.12a)$$

$$X_8 = \text{tr}(R_2^4) + \frac{[\text{tr}(R_2^2)]^2}{4} - \frac{\text{Tr}_a(F_2^2)\text{tr}(R_2^2)}{30} + \frac{\text{Tr}_a(F_2^4)}{3} - \frac{[\text{Tr}_a(F_2^2)]^2}{900}. \quad (3.3.12b)$$

まず, $G = \text{SO}(n)$ のとき, 任意の生成元 $t \in \mathfrak{so}(n)$ に対し,

$$\text{Tr}_a(t^2) = (n-2)\text{Tr}_v(t^2), \quad (3.3.13a)$$

$$\text{Tr}_a(t^4) = (n-8)\text{Tr}_v(t^4) + 3[\text{Tr}_v(t^2)]^2, \quad (3.3.13b)$$

$$\text{Tr}_a(t^6) = (n-32)\text{Tr}_v(t^6) + 15\text{Tr}_v(t^2)\text{Tr}_v(t^4), \quad (3.3.13c)$$

より, 第2項は

$$\frac{32-n}{1440} \left\{ \text{Tr}_v(F_2^6) - \frac{n+22}{48} \text{Tr}_v(F_2^2) \text{Tr}_v(F_2^4) + \frac{(n-2)(n+28)}{14400} [\text{Tr}_v(F_2)]^3 \right\} \quad (3.3.14)$$

より, $n = 32$ のときのみゼロとなる. 同様に, $G = E_8$ に対して,

$$\text{Tr}_a(t^4) = \frac{1}{100} [\text{Tr}_a(t^2)]^2, \quad \text{Tr}_a(t^6) = \frac{1}{7200} [\text{Tr}_a(t^2)]^3 \quad (3.3.15)$$

より, 第2項は $G = E_8 \times E_8, E_8 \times U(1)^m$ のときゼロ. 第3項は, $G = \text{SO}(32), E_8 \times E_8, E_8 \times U(1)^{248}, U(1)^{496}$ に対してゼロ.

3.3.3 Green-Schwarz 機構

次に, (ヘテロ表示での) 作用積分において, \tilde{H}_3 の定義を

$$\tilde{H}_3 = dB_2 - c\omega_{3Y} - c'\omega_{3L}; \quad (3.3.16)$$

$$\omega_{3Y} = \text{Tr} \left(A_1 \wedge dA_1 - \frac{2i}{3} A_1 \wedge A_1 \wedge A_1 \right), \quad (3.3.17)$$

$$\omega_{3L} = \text{tr} \left(\omega_1 \wedge d\omega_1 + \frac{2}{3} \omega_1 \wedge \omega_1 \wedge \omega_1 \right) \quad (3.3.18)$$

に置き換え, ゲージ変換を

$$\delta A_1 = d\lambda - i[A_1, \lambda], \quad (3.3.19a)$$

$$\delta \omega_1 = d\Theta + [\omega_1, \Theta], \quad (3.3.19b)$$

$$\delta B_2 = c \text{Tr}(\lambda dA_1) + c' \text{tr}(\Theta d\omega_1) \quad (3.3.19c)$$

と定義すると, Chern-Simons 型繰り込み項

$$\mathbf{S}' = \int B_2 X_8(F_2, R_2) \quad (3.3.20)$$

は, ゲージ変換に補正

$$\delta \mathbf{S}' = \int \delta B_2 X_8 \quad (3.3.21)$$

を与える. これは, アノーマリー換算で

$$\begin{aligned} \hat{I}'_{10} &= [c \text{Tr}_a(\lambda dA_1) + c' \text{tr}(\Theta d\omega_1)] X_8 \\ \Rightarrow \hat{I}'_{12} &= [c \text{Tr}_a(F_2^2) + c' \text{tr}(R_2^2)] X_2 \end{aligned} \quad (3.3.22)$$

となる. よって,

$$c' = -\frac{c}{30} \quad (3.3.23)$$

ととれば、第1項と相殺する（Green-Schwarz 機構）。このとき、

$$d\tilde{H}_3 = \frac{\alpha'}{4} \left[\text{tr}(R_2^2) - \frac{1}{30} \text{Tr}_a(F_2^2) \right]; \quad 4\kappa_{10}^2 = \alpha' g_{10}^2. \quad (3.3.24)$$

以上より、I型理論では、 $G = \text{SO}(32), E_8 \times E_8, E_8 \times \text{U}(1)^{248} \cdot \text{U}(1)^{496}$ に対して、アノマリーは相殺する。ただし、理論の超対称性より、 $\text{U}(1)$ 因子に対しても、 \tilde{H} の定義で ω_{CS} を加える必要がある [Bergshoeff E, de Roo M, de Wit B, van Nieuwenhuizen P: NPB195:97(1982)]. ゲージ不変性より、これは B のゲージ変換も対応する修正を受けることを意味する。ところが、この修正のため、ゲージ変換の際に BX_8 から $\text{U}(1)$ 因子に対応する付加項が生じ、ゲージ不変性を破る。すなわち、 $\text{U}(1)$ があると、超対称性の要請と Green-Schwarz 機構が整合的でなくなる。よって、整合的な理論は、 $G = \text{SO}(32), E_8 \times E_8$ のみ。

§3.4

Brane

3.4.1 分類

D 次元時空における p -brane は, C_{p+1} ポテンシャルと電氣的に, C_{D-p-3} ポテンシャルと磁氣的に結合する. すなわち, $dC_{D-p-3} = *dC_{p+1}$ として,

$$\text{Electric} : \mu_p \int_{D_p} C_{p+1}, \tag{3.4.1a}$$

$$\text{Magnetic} : \mu'_p \int_{D_p} \tilde{C}_{p+1}. \tag{3.4.1b}$$

フォーム場 F_{D-p-2} の磁荷ないし F_{p+2} の電荷を持ちうる:

$$\text{Electric charge} : \int_{S_{D-p-2}} *F_{p+2} = 2\kappa_{10}^2 \mu_p, \tag{3.4.2a}$$

$$\text{Magnetic charge} : \int_{S_{D-p-2}} F_{D-p-2} = 2\kappa_{10}^2 \mu'_p. \tag{3.4.2b}$$

	Potential	Flux	electric	magnetic
	Φ	$d\Phi$	—	NS7(?)
	B_2	H_3	F1	NS5
	C_1	F_2	D0	D6
IIA	C_3	F_4	D2	D4
	(C_5)	(F_6)	D4	D2
	(C_7)	(F_8)	D6	D0
	C_9	F_{10}	D8	—
	$C_{10}(?)$	0	D9(?)	—

	Potential	Flux	electric	magnetic
	Φ	$d\Phi$	—	NS7(?)
	B_2	H_3	F1	NS5
	C_0	F_1	D-1	D7
IIB	C_2	F_3	D1	D5
	$(C_4)_+$	$(F_5)_+$	D3	D3
	(C_6)	(F_7)	D5	D1
	(C_8)	(F_9)	D7	D-1
	C_{10}	0	D9	—

3.4.2 D ブレーンの作用積分

References

- Anomaly cancelation, inflow and brane action
 - Izquierdo JM, Townsend PK: NPB 414:93 (1994), “Axionic defect anomalies and their cancellation”
 - Green MB, Harvey JA, Moore G: CQG14:47(1997), “I-brane inflow and anomalous couplings on D-branes”
 - Cheung YK, Yin Z: NPB 517:67 (1998) “Anomalies, branes, and currents”
 - Minasian R, Moore GW: JHEP9711:002 (1997) “K-theory and Ramond-Ramond charge”

DBI 作用積分 1枚の Dp ブレーンに対する DBI 作用積分は, F をその上の $U(1)$ ゲージ場フラックスとして, [11]

$$S_{\text{DBI}, Dp} = -\mu_p \int_{\Sigma^{p+1}} d^{p+1}\xi e^{-\Phi(X)} \sqrt{-\det(g_{ab}(X) + 2\pi\alpha' \mathcal{F}_{ab}(X))}. \quad (3.4.3)$$

ここで,

$$2\pi\alpha' \mathcal{F} = 2\pi\alpha' F - B, \quad (3.4.4)$$

$$\mu_p = 2\pi\ell_s^{-p-1} \times \begin{cases} 1 & \text{for type II} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \text{for type I} \end{cases} \quad (3.4.5)$$

(B の符号が標準のものと異なるが, こうしないと CS 作用積分のゲージ不変性が破れる.)

ゲージ群が非可換となる 2枚以上の重なった Dp ブレーンに対する作用は知られていない.

Chern-Simons 作用積分 $C = \sum_q C_q / \ell_s^q$ として, Dp ブレーン B^{p+1} と RR 場との結合は

$$S_{\text{CS}} = 2\pi \int_{B^{p+1}} C \wedge \text{Tr} e^{-\frac{B}{\ell_s^2} + \frac{F}{2\pi}} \frac{\sqrt{\hat{A}(TB)}}{\sqrt{\hat{A}(NB)}} \quad (3.4.6)$$

ここで $\hat{A}(TB)$ と $\hat{A}(NB)$ は, それぞれブレーンの接バンドル, 法バンドルの \hat{A} -特性類. ただし, ゲージ場はエルミートな行列に値を取るものを取る.

また, O_p 面に対する DBI 作用積分は

$$S_{\text{CS}} = -2^{p-4} 2\pi \int_{B^{p+1}} C \wedge \frac{\sqrt{L(\mathcal{R}_T/4)}}{\sqrt{L(\mathcal{R}_N/4)}} \quad (3.4.7)$$

ここで, L は Hirzebruch 特性類, $\mathcal{R}_T, \mathcal{R}_N$ は O_p 面の接バンドルおよび法バンドルの曲率形式 (l_s のべきで無次元化されたもの).

§3.5

String axions

概要 弦理論・M理論では、現実的な4次元宇宙を与えるコンパクト化により多様なアクシオンが自然に生み出される [22, 1]. 超弦理論に本質的な要素として含まれる微分形式場がその起源となる [19].

3.5.1 ヘテロ型理論

Calabi-Yau コンパクト化 ヘテロ型理論を Calabi-Yau 3-fold Y と4次元時空 X の直積にコンパクト化すると、2-形式場 B は2種類の X 上のアクシオン場を生み出す. 直積型コンパクト化

$$ds^2(M_{10}) = ds^2(X_4) + ds^2(Y_6). \quad (3.5.1)$$

において, $\eta^i (i = 1, \dots, b_2(Y))$ を $H_2(Y, \mathbb{Z})$ の基底に双対な Y 上の調和2形式の基底とする. このとき, B は

$$B = \ell_s^2 \sum_{i=1}^{b_2(Y)} \alpha_i(x) \eta^i + \beta(x), \quad (3.5.2)$$

と展開される. ここで, $\ell_s = 2\pi\sqrt{\alpha'}$, $\beta(x)$ は X_4 上の2形式. これを作用積分 S_B に代入して,

$$2\kappa_{10}^2 S_B = -\frac{V_Y}{2g_s^2} \int_{X_4} \left[\sum Y^{ij} *d\alpha_i \wedge d\alpha_j + *h \wedge h + \frac{\theta}{\pi} \{dh - \ell_s^2 (4\pi)^{-2} (\text{Tr}(F \wedge F) - \text{tr}(\mathcal{R} \wedge \mathcal{R}))\} \right] \quad (3.5.3)$$

ここで, V_Y を Y の体積, h を H の4次元部分, $\theta(x)$ はアノーマリー相殺条件に対する lagrange multiplier.

$$Y^{ij} = \ell_s^4 V_Y^{-1} \int_{Y_6} *\eta^i \wedge \eta^j \quad (3.5.4)$$

h に関する変分より, $d\theta = 2\pi *h$ が得られる. これを用いて B を消去すると, θ はダイナミカルな擬スカラ場となり, その作用は次式で与えられる:

$$S_a = \int_{X_4} \left[-\frac{1}{2} \sum Y^{ij} *da_i \wedge da_j - \frac{1}{2} *da \wedge da + \frac{\lambda}{f_a} a \{ \text{Tr}(F \wedge F) - \text{tr}(\mathcal{R} \wedge \mathcal{R}) \} \right], \quad (3.5.5)$$

ここで、 f_a は次式で定義されるアクシオン崩壊定数である：

$$f_a = \frac{\sqrt{V_Y}}{2\sqrt{2}\pi\kappa_{10}g_s} = \frac{L^3}{\sqrt{2\pi}g_s\ell_s^4} = \frac{m_{\text{pl}}}{2\sqrt{2}\pi}, \quad (3.5.6)$$

ただし、 $V_Y = L^6$, a_i と a は $a_i = f_a\alpha_i$ および $a = f_a\theta$ で定義される次元を持つアクシオン場, λ は無次元量

$$\lambda = \frac{\ell_s^2 f_a^2}{2\pi^2} = \frac{m_{\text{pl}}^2 \ell_s^2}{16\pi^3}. \quad (3.5.7)$$

である。ここで、実際のアクシオンスケール a_i は、 $Y^{ij} \sim (\ell_s/L)^4$ より、一般に f_a より小さい。

このようにして得られる2種類のアクシオン場のうち、内部空間のサイクルより得られる a_i はモデル依存アクシオン, $B_{\mu\nu}$ より得られる a はモデル非依存アクシオンと呼ばれる。いずれのアクシオンに対しても、作用積分(3.5.5)はシフト対称性をもつ。さらに、モデル非依存アクシオン a は、QCD アクシオンと同様、ゲージ場および重力場と Chen-Simons 相互作用をする。これに対して、モデル依存アクシオンは一見、そのような相互作用をしないように見える。また、それらは CP-even d に見える。しかし、実際には、量子補正を考えると、ゲージアノマリーを相殺するため Green-Schwartz 相殺項

$$S = \int_{M_{11}} B \wedge X_8(F, \mathcal{R}) \quad (3.5.8)$$

がモデル依存アクシオンと $\text{Tr}(F \wedge F)$ および $\text{tr}(\mathcal{R} \wedge \mathcal{R})$ との相互作用を生み出す [22]. ここで、

$$X_8 = \text{tr}(R_2^4) + \frac{[\text{tr}(R_2^2)]^2}{4} - \frac{\text{Tr}_a(F_2^2)\text{tr}(R_2^2)}{30} + \frac{\text{Tr}_a(F_2^4)}{3} - \frac{[\text{Tr}_a(F_2^2)]^2}{900} \quad (3.5.9)$$

3.5.2 II 型理論

CY コンパクト化 B は、IIB 型理論ではモデル非依存アクシオン a を、また、IIA 型理論では、モデル依存アクシオン a_i を生成する。一方、IIB 型での a_i 場と IIA 型での a 場は共に CP even となる。ヘテロ型の場合と異なり、 $F \wedge F$ や $\mathcal{R} \wedge \mathcal{R}$ との結合は生成されない。しかし、II 型理論では、ヘテロ型と異なり、様々な RR 場 C_p が存在し、特に IIA 型での C_3 および IIB 型での C_{2q} ($q = 0, 1, 2$) は、ヘテロの場合と同じ機構で、モデル依存アクシオンを生み出す。さらに、これらのアクシオンは、D ブレーンでの RR 場とゲージ場および重力場との結合を通して、ゲージ場および重力場との CS 結合を獲得する [22].

これらのうち、モデル依存型アクシオンは、内部空間が位相的に複雑になるほど多種になる。特に、IIB 型理論のフラックスコンパクト化では、ワープのために adS 真空の uplift に膨大な数の2サイクルが必要となり、対応して非常に多種のア

クシオンが生成されることになる [10]. また, ヘテロ型理論でも, Betti 数 $Ab_2(Y)$ に対する明確な制限は得られていないが, トーリック型 CY の組織的な探査研究では, 一般的な CY で $b_2(Y)$ が非常に大きくなることが知られている.[16]

3.5.3 質量スペクトル

ブレーンやフラックスの導入, コンパクト化によりアクシオン場のシフト対称性が破れないときには, ($N = 1$ 超対称性を仮定すると) 摂動的な量子補正によってこの対称性が破れることはない. この場合, アクシオンは, QCD アクシオンと同様に, インスタントン効果などに非摂動論的效果によってのみ質量を獲得する. 実際に, QCD アクシオンが存在する場合には, 他にも多くのストリングアクシオンが残ると考えるのが自然である.

アクシオン質量の大きさは次のように評価できる. まず, 一般にインスタントン効果によるアクシオン質量は

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2}f_a^2(\partial\theta)^2 - \Lambda^4 U(\theta); \quad \Lambda^4 \approx M^4 e^{-S}, \quad (3.5.10)$$

と表される. ここで, S はインスタントンの作用積分である. 関係式

$$m_{\text{pl}}^2 \sim g_s^{-2} L^6 t_s^{-8}, \quad f_a^2 \sim g_s^{-2} L^6 t_s^{-4} (L^2)^{-2} = g_s^{-2} L^2 t_s^{-4}, \quad S \sim t_s^{-2} L^2 \quad (3.5.11)$$

より,

$$f_a = m_{\text{pl}}/S \quad (3.5.12)$$

が得られるので,

$$m_a \approx \Lambda^2/f_a \sim (M^2/m_{\text{pl}}) S e^{-S/2} \quad (3.5.13)$$

QCD アクシオンの全ポテンシャルは, QCD の寄与と弦理論的寄与の和となる:

$$V = V_{\text{QCD}} + \Lambda^4 \cos\left(\frac{a}{f_a} + \psi\right); \quad V_{\text{QCD}} = \frac{a^2}{8f_a^2} r^2 F_\pi^2 m_\pi^2 \frac{m_u m_d}{(m_u + m_d)^2}. \quad (3.5.14)$$

ここで, 弦理論の寄与が QCD の寄与より小さいことを要請すると, 次の制限が得られる.

$$a \approx \frac{M^4 e^{-S}}{m_\pi^2 F_\pi^2} < 10^{-10} \Rightarrow S \approx 200 \Rightarrow f_a \approx 10^{16} \text{GeV}, \quad m_a \lesssim 10^{-15} \text{eV} \quad (3.5.15)$$

この式より, 超弦理論アクシオンの質量は, $\log m$ に関して一様に分布していることが期待される.

4

地上実験

§4.1

New force

References

- [ADD98] Antoniadis, I., Dimopoulos, S. and Dvali, G.: Millimeter range forces in superstring theories with weak scale compactification, *Nucl. Phys. B* **516**, 70–82 (1998).
- [DG96] Dimopoulos, S. and Giudice, G.: Macroscopic forces from supersymmetry, *Phys. Lett. B* **379**, 105–14 (1996).
- [FL99] Floratos, E. and Leontaris, G.: Low scale unification, Newton’s law and extra dimensions, *Phys. Lett. B* **465**, 95–100 (1999).
- [KS00] Kehagias, A. and Sfetsos, K.: Deviations from the $1/r^2$ Newton law due to extra dimensions, *Phys. Lett. B* **472**, 39–44 (2000).
- [Tv88] Taylor, T. and Veneziano, G.: Strings and $D=4$, *Phys. Lett. B* **212**, 147–152 (1988).
- [MW84] Moody, J.E. and Wilczek, F: New macroscopic forces?, *Phys. Rev. D* **30**, 130 (1984).

4.1.1 Scalar force

スカラ場 $\phi(x)$ と外部源 $\rho(x)$ の相互作用を

$$\mathcal{L}_\rho = \phi\rho \quad (4.1.1)$$

とおくと、その分配関数への寄与は

$$\left\langle T \exp \left(-i \int d^4x \mathcal{L} \right) \right\rangle \approx e^{-iET+\dots} \quad (4.1.2)$$

で表される。ここで、 T は積分領域の時間幅で、

$$ET \approx \frac{1}{2} \int d^4x d^4y \rho(x) \Delta(x-y) \rho(y), \quad (4.1.3)$$

$$\Delta(x-y) = -i \langle T(\phi(x)\phi(y)) \rangle = \frac{1}{\square - \mu^2 + i\epsilon} \delta^4(x-y). \quad (4.1.4)$$

特に、静的な源 $\rho(x) = \rho(\mathbf{x})$,

$$\rho(\mathbf{x}) = \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \hat{\rho}(\mathbf{p}) e^{i\mathbf{p}\cdot\mathbf{x}} \quad (4.1.5)$$

に対しては、

$$E = \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \frac{|\hat{\rho}(p)|^2}{-(p^2 + \mu^2) + i\epsilon}. \quad (4.1.6)$$

これをポテンシャル力のエネルギー

$$\int d^3x \rho(x) V(x-y) \rho(y) = \int d^3q |\hat{\rho}(\mathbf{q})|^2 \hat{V}(\mathbf{q}), \quad (4.1.7a)$$

$$V(x) = \int d^3p \hat{V}(\mathbf{p}) e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{x}}, \quad (4.1.7b)$$

と比較すると、

$$\hat{V}(\mathbf{q}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{1}{-(q^2 + \mu^2) + i\epsilon}. \quad (4.1.8)$$

よって、

$$V(x) = \int \frac{d^3q}{(2\pi)^3} \frac{e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{x}}}{-(q^2 + \mu^2) + i\epsilon} = -\frac{e^{-\mu r}}{4\pi r}. \quad (4.1.9)$$

4.1.2 Pseudo-scalar force

相互作用ラグランジアン

$$\mathcal{L}_I = \partial_\mu \phi j_A^\mu \cong \phi \rho_A; \quad \rho_A = -\partial_\mu j_A^\mu \quad (4.1.10)$$

について、同様の議論を行う。まず、運動方程式

$$(\not{\partial} - m)\psi = 0 \quad (4.1.11)$$

を用いると、

$$j_5^\mu = \frac{1}{f_a} \bar{\psi} \gamma^\mu \gamma_5 \psi \Rightarrow \rho_5 = \frac{m}{f_a} \bar{\psi} \gamma_5 \psi. \quad (4.1.12)$$

ここで、

$$\psi(x) = \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} u(\mathbf{p}) e^{i\mathbf{p} \cdot \mathbf{x}}, \quad (4.1.13)$$

$$u(\mathbf{p}) = \frac{1}{\sqrt{2m}} \begin{pmatrix} (E - \mathbf{p} \cdot \boldsymbol{\sigma}) \chi(\mathbf{p}) \\ m \chi(\mathbf{p}) \end{pmatrix} \quad (4.1.14)$$

より、

$$\begin{aligned} \bar{\psi} \gamma_5 \psi &= \int \frac{d^3 p_2}{(2\pi)^3} \int \frac{d^3 p_1}{(2\pi)^3} e^{i(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2) \cdot \mathbf{x} - i(E_1 - E_2)t} u(\mathbf{p}_2)^* \gamma^0 \gamma_5 u(\mathbf{p}_1) \\ &= \int \frac{d^3 q}{(2\pi)^3} e^{i\mathbf{q} \cdot \mathbf{x}} \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} e^{-i(E_1 - E_2)t} \frac{i}{2m} \left(\frac{2\mathbf{p} \cdot \mathbf{q}}{E_1 + E_2} - \mathbf{q} \cdot \langle \boldsymbol{\sigma} \rangle \right) \chi^\dagger \chi. \end{aligned} \quad (4.1.15)$$

したがって、 $|x|m \gg 1$ では、

$$\rho_5 \simeq \frac{m}{f_a} \int \frac{d^3 q}{(2\pi)^3} \left(-\frac{i}{2m} \right) \mathbf{q} \cdot \langle \boldsymbol{\sigma} \rangle \tilde{\rho}(\mathbf{q}) e^{i\mathbf{q} \cdot \mathbf{x}}, \quad (4.1.16)$$

$$\hat{\rho}(\mathbf{q}) = \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} \chi^\dagger(\mathbf{p}) \chi(\mathbf{p}). \quad (4.1.17)$$

よって、

$$E = \frac{1}{4f_a^2} \int \frac{d^3 q}{(2\pi)^3} \frac{(\mathbf{q} \cdot \langle \boldsymbol{\sigma} \rangle)^2}{-(q^2 + \mu^2) + i\epsilon} |\hat{\rho}(\mathbf{q})|^2. \quad (4.1.18)$$

これより、

$$\hat{V}(\mathbf{q}) = \frac{1}{4f_a^2 (2\pi)^3} \frac{(\mathbf{q} \cdot \langle \boldsymbol{\sigma} \rangle)^2}{-(q^2 + \mu^2) + i\epsilon}. \quad (4.1.19)$$

逆 Fourier 変換により、

$$\begin{aligned} V(x) &= -(\boldsymbol{\sigma} \cdot \partial_{\mathbf{x}})^2 \frac{1}{4f_a^2} \left(-\frac{e^{-\mu r}}{4\pi r} \right) \\ &= \frac{1}{16\pi f_a^2} \left[\left(\frac{\mu^2}{r} + \frac{3\mu}{r^2} + \frac{3}{r^3} \right) (\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma})^2 - \left(\frac{\mu}{r^2} + \frac{1}{r^3} \right) \sigma^2 \right] e^{-\mu r} \end{aligned} \quad (4.1.20)$$

4.1.3 実験的制限

2粒子間のポテンシャルを，重力を基準として

$$V = -G_N \frac{m_1 m_2}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda}) \quad (4.1.21)$$

と表すとき，これまでに得られた2つのパラメータ α, λ への実験的制限をまとめたのが図4.1である。

また，³間の axion によるスピン依存力を NMR を用いて計る実験から期待される制限を書いたのが図??である。ただし， $C_f = y_{\text{He}^3 a}$ として，

$$g_p = C_f \frac{m_f}{f_a} = 10^{-9} \frac{m_f}{1\text{GeV}} \frac{10^9\text{GeV}}{f_a} \quad (4.1.22)$$

である。

(注) 基準となる特徴的無次元量

- 重力：

$$\frac{G_N m_p^2}{\hbar c} \simeq 5.90 \times 10^{-39} \quad (4.1.23)$$

- 電磁力：

$$\frac{e^2}{\hbar c} \simeq \frac{1}{137} \quad (4.1.24)$$

- 擬スカラ交換力：

$$\left(\frac{\hbar c}{f_a r} \right)^2 \simeq (1.97 \times 10^{-21})^2 \left(\frac{10^{10}\text{GeV}}{f_a} \right)^2 \left(\frac{1\mu\text{m}}{r} \right)^2 \quad (4.1.25)$$

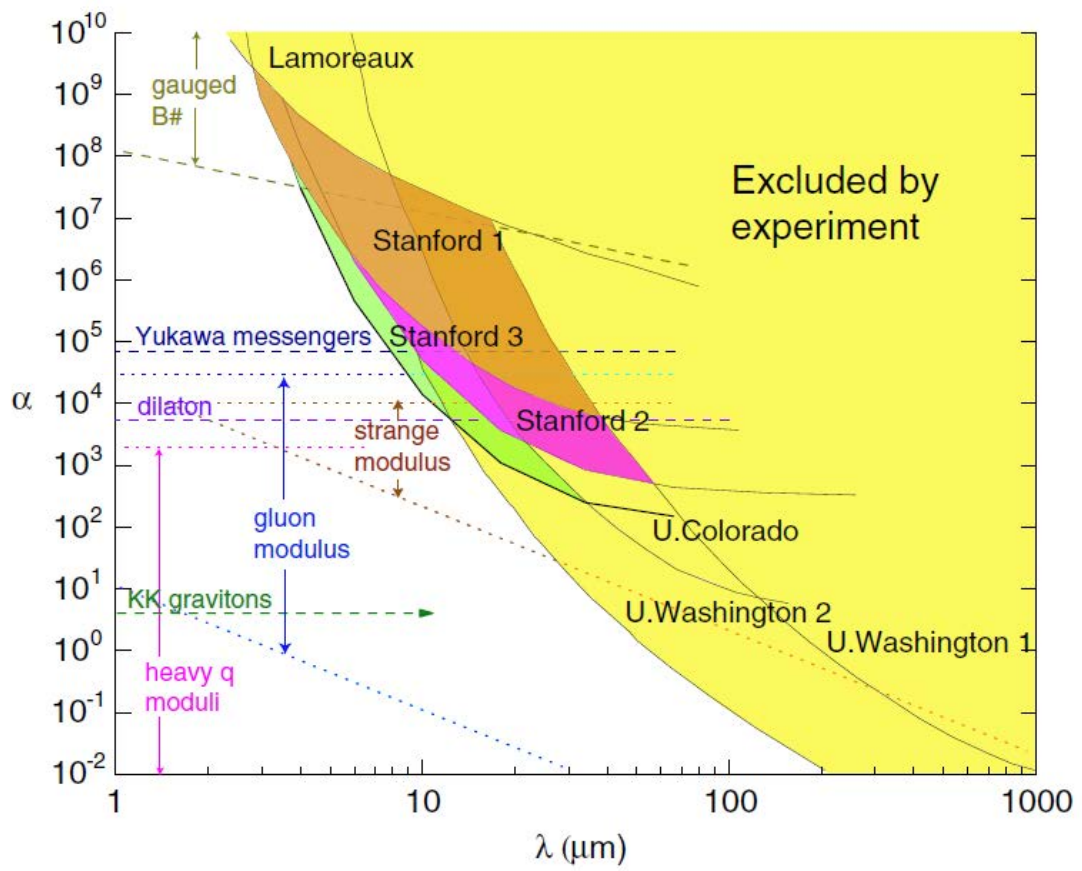


図 4.1: New force への実験的制限 [Geraci AA et al:PRD78(2008)022002]

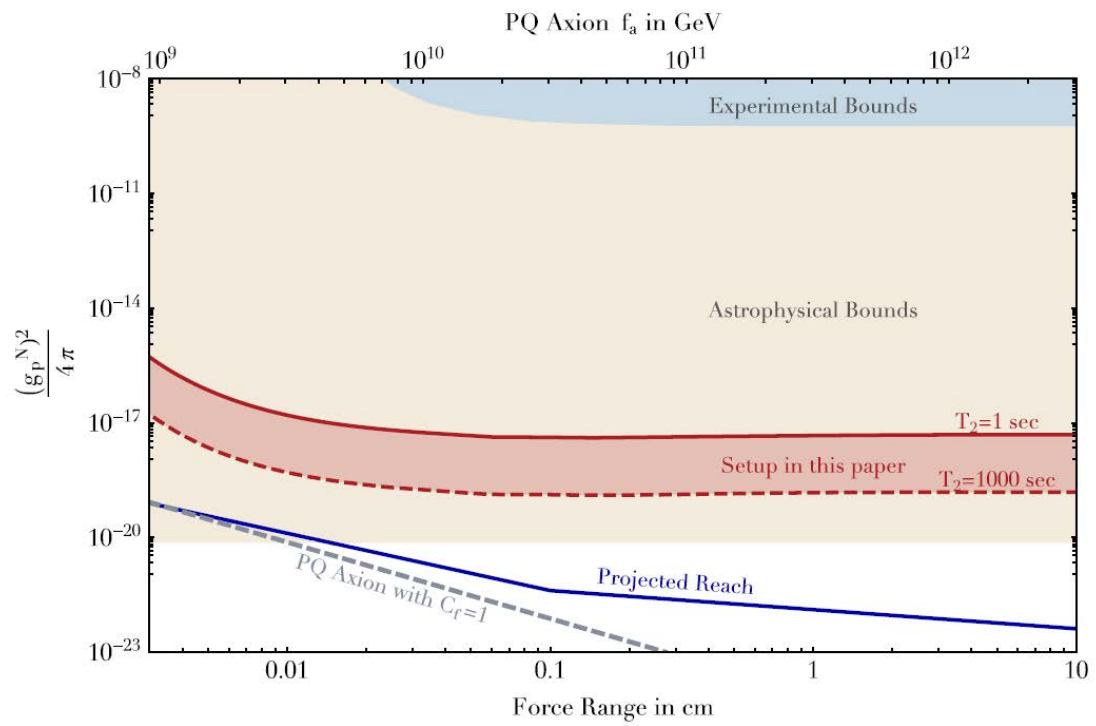


図 4.2: NMR を用いた実験で期待される He^3 原子核間の Axion force への制限 [Arvanitaki A, Geraci AA:PRL113, 161801(2014)]

§4.2

検出実験

4.2.1 Project Overview

- Cavity search (Sikivie P 1983)
- Helioscope method (Sikivie P 1983)
 - CAST experiment
- Bragg scattering method (Paschos EA, Zioutas K1994)
 - SOLAX experiment
 - COSME experiment
- Resonant method (Krcmar M, Krecak Z, Stipcevic M, Ljubicic A, Bradley DA 1998)
- Polarisation of light in B (Mainai L, Petronzio R, Zavattini E 1986)
 - PLVAS experiment
- Photo regeneration method (Cameron R et al 1993)
 - BERT Collaborations
 - * 1990s no detection
 - HERA
 - VUV-FEL
 - PVLAS
 - * Indication of the axion-photon mixing with $m_a \simeq 1.3\text{meV}$, $g_{a\gamma\gamma} \simeq 3 \times 10^{-6}\text{GeV}^{-1}$ [Zavattini E et al, PRL96:110406(2006)]
 - * この結果を否定 [Zavattini E et al: arXive:0706.3419]
 - French group
 - * No detection: $M > 8 \times 10^5\text{GeV}$ for $m_a \sim 1\text{meV}$ [Robilliard C et al; PRL99:190403 (2007)]
 - ALPS@DESY (Axion-Like Particle Search project)

- LIPSS@Jefferson Laboratory (Light PseudoScalar Search project)
- BMV project
- OSQAR@CERN (Optical Search for Qed vacuum magnetic birefringence, Axions and photon Regeneration project)
- GVPSE@Fermilab (GammeV Particle Search Experiment project)

4.2.2 Cast experiment

概要

- Primakoff効果により太陽中心で生成されたアクシオンを磁気望遠鏡。(9.26m×2・14.5cm² LHC 双極磁石) により光子に変換して検出。
 - CAST Coll: First Results from the CERN Axion Solar Telescope, PRL94:121301 (2005)
 - Zioutas K et al: A decommissioned LHC model magnet as an axion telescope, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A425:480 (1999) [astro-ph/9801176]

結果

- Cast Phase I: $m_a < 0.02\text{eV}$
 - $g_{a\gamma\gamma} < 1.16 \times 10^{-10}\text{GeV}^{-1}$ [CAST Coll: PRL94:121301 (2005)]
 - $g_{a\gamma\gamma} < 8.8 \times 10^{-11}\text{GeV}^{-1}$ (95% CL) [CAST Coll: JCAP 04:010 (2007)]
- Cast Phase II: $m_a < 1\text{eV}$
 - $g_{a\gamma\gamma} \lesssim 2.3 \times 10^{-10}\text{GeV}^{-1}$ (95% CL) for $0.39\text{eV} \lesssim m_a \lesssim 0.64\text{eV}$. [Aune S et al (CAST coll.): PRL107(2011)261302[arXiv:1106.3919[hep-ex]]].

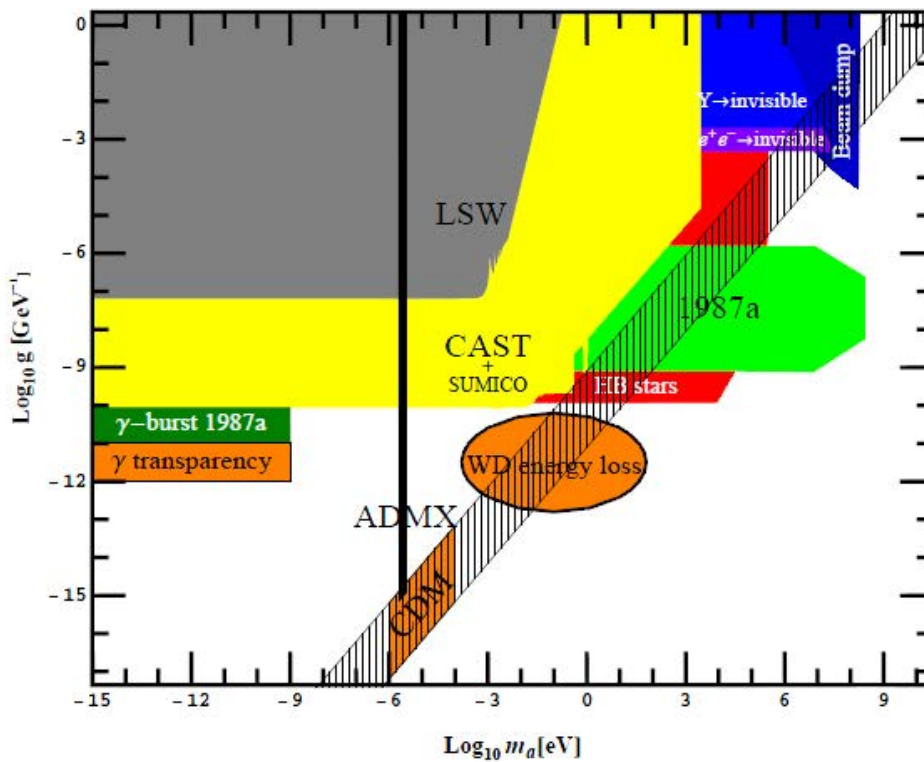
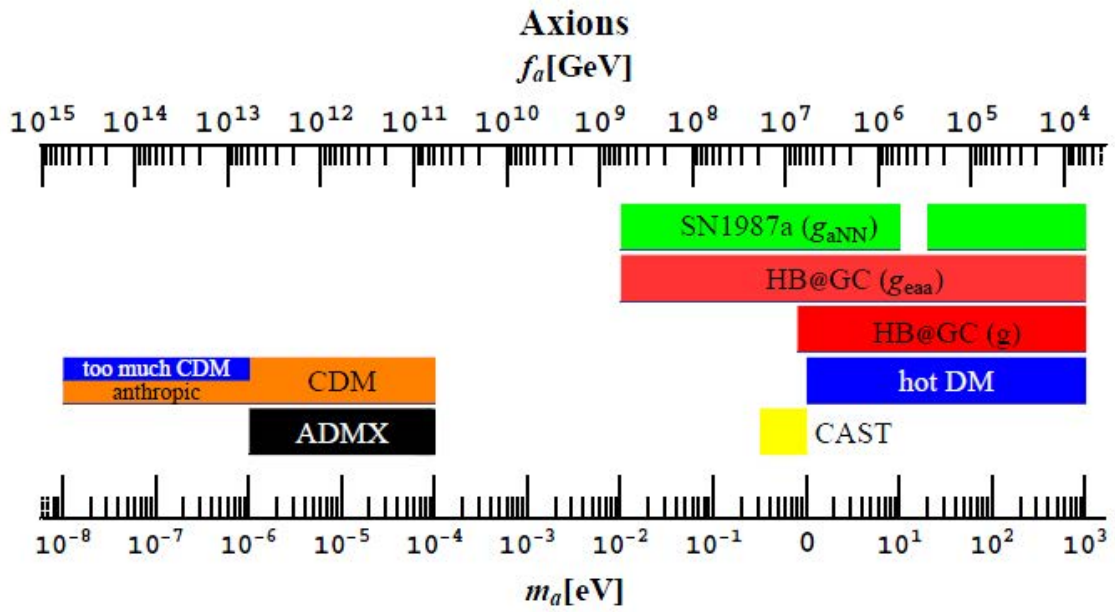


図 4.3: QCD アクシオンへの制限 [Jaeckel J, Ringwald A:arXiv:1002.0329]

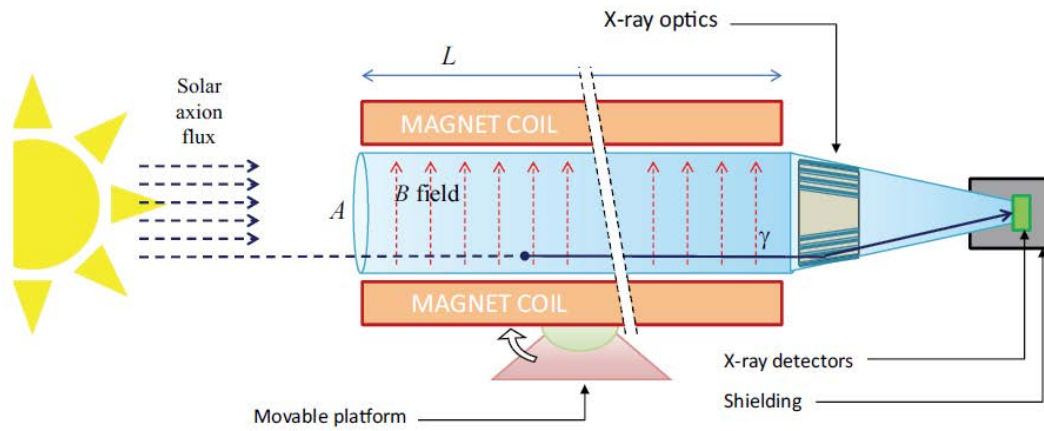


図 4.4: Solar Helio Scope[Armengaud et al: arXiv1401.3233(IAXO conceptual design)]

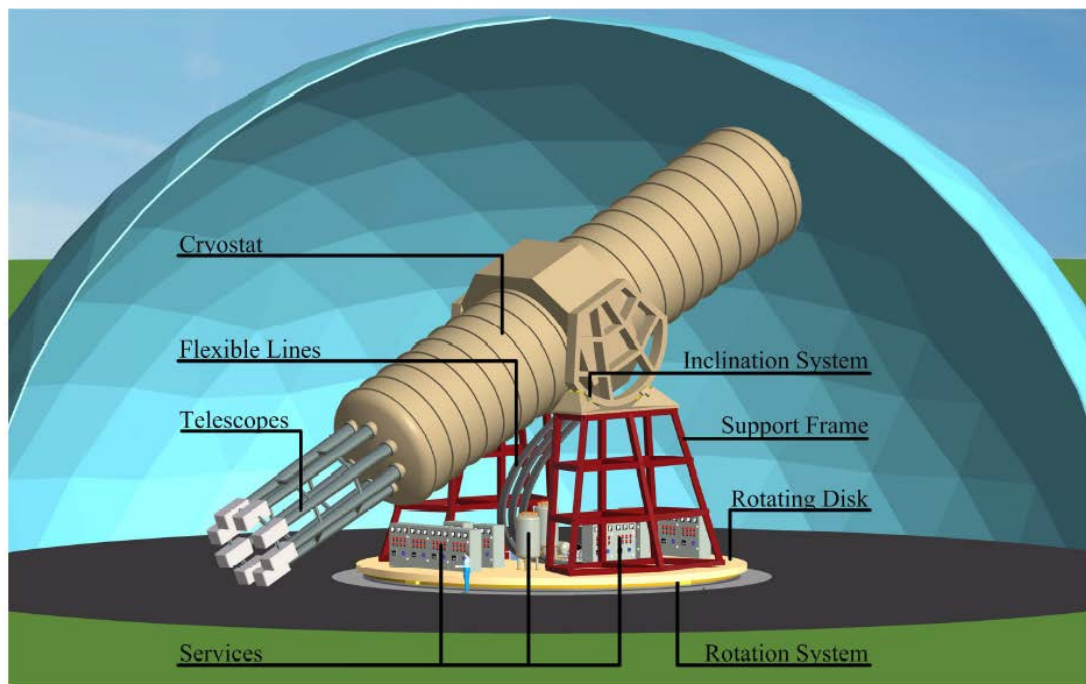


Figure 2. Schematic view of IAXO. Shown are the cryostat, eight x-ray optics and detectors, the flexible lines guiding services into the magnet, cryogenics and powering services units, inclination system and the rotating disk for horizontal movement. The dimensions of the system can be appreciated by a comparison to the human figure positioned by the rotating table.

図 4.5: IAXO[Armengaud et al: arXiv1401.3233(IAXO conceptual design)]

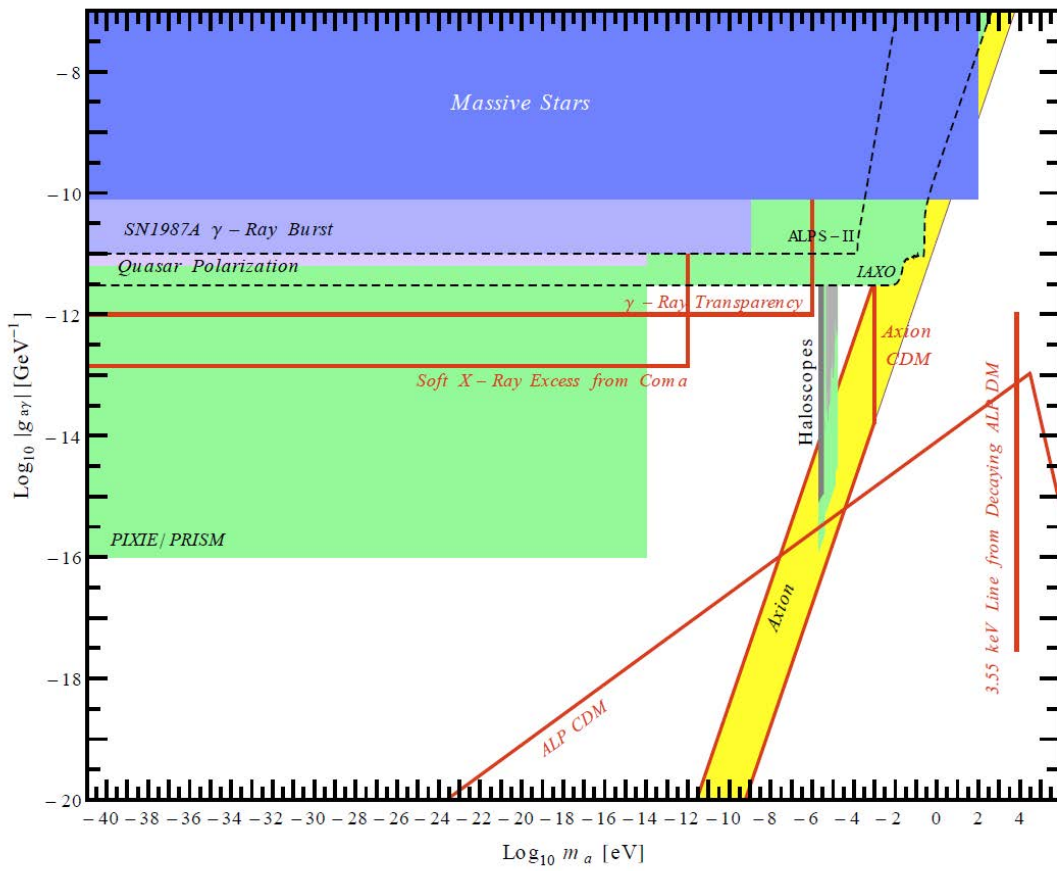


図 4.6: ALP 粒子の質量と電磁 CS 結合係数に対する将来実験を含む実験からの制限 [Ringwald A:arXiv:1407.0546]

5

Astrophysics

§5.1

Axion emission processes

5.1.1 Overview

- Primakov process $\mathcal{L}_{a\gamma\gamma}$: aEB + fluctuating plasma E/B .

$$\mathcal{L} = g_{a\gamma} a \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}. \quad (5.1.1)$$

(注)

$$g_{a\gamma} = \xi \frac{\alpha}{\pi f_a} \sim \frac{\xi}{430 f_a} \quad (5.1.2)$$

- Axion Bremsstrahlung \mathcal{L}_{aee} : $aee + eZe$ 散乱
- Axion nucleon emission \mathcal{L}_{aNN} : $aq\bar{q} + NN$ 散乱

$$\mathcal{L} = \frac{C_j}{2f_a} \partial_\mu a \bar{\psi}_j \gamma^\mu \gamma_5 \psi. \quad (5.1.3)$$

5.1.2 Primakoff process

References

- Primakoff H: "Photon-production of neutral mesons in nuclear electric fields and the mean life of the neutral meson", PR81(1951)899.
- Dicus DA, Kolb EW, Teplitz EW, Wagoner RV: "Astrophysical bounds on the masses of axions and Higgs particles", PRD18 (1978) 1829.

荷電粒子との衝突による変換断面積 CS 相互作用において、電場を荷電粒子（原子核 Z ）による電場

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi = \int \frac{d^3q}{(2\pi)^3} \phi(q) e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}}; \quad \phi(q) = -\frac{1}{q^2} \quad (5.1.4)$$

に置き換え、 \mathbf{B} を入射光子の磁場

$$\mathbf{B} = \int \frac{d^3k_\gamma}{(2\pi)^3} \sum_\alpha [(\mathbf{k}_\gamma \times \mathbf{e}_\alpha) a_\alpha(\mathbf{k}_\gamma) e^{ik\cdot x} + \text{h.c.}] \quad (5.1.5)$$

と見なすと、

$$\frac{d\sigma_{\gamma \rightarrow a}}{d\Omega} = \frac{g_{a\gamma}^2 Z^2 \alpha}{8\pi} \frac{|\mathbf{k}_\gamma \times \mathbf{k}_a|^2}{q^4}, \quad (5.1.6)$$

ここで、

$$\mathbf{q} = \mathbf{k}_\gamma - \mathbf{k}_a. \quad (5.1.7)$$

ただし、

$$\omega \equiv k_\gamma = E_a \equiv (k_a^2 + m_a^2)^{1/2} \quad (5.1.8)$$

より、

$$q \geq q_{\min} = \omega - \sqrt{\omega^2 - m_a^2} = \frac{m_a^2}{\omega + \sqrt{\omega^2 - m_a^2}}. \quad (5.1.9)$$

これは IR cut-off を与える。

$\gamma \rightarrow a$ 変換率

$$\Gamma_{\gamma \rightarrow a} = \frac{g_{a\gamma}^2 T k_s^2}{32\pi} \left[\left(1 + \frac{k_s^2}{4E^2}\right) \ln \left(1 + \frac{4E^2}{k_s^2}\right) - 1 \right] \quad (5.1.10)$$

($\hbar = c = k_B = 1$). ここで、スクリーニングスケール k_s は、Debye-Hückel 近似のもとで、次式で与えられる：

$$k_s^2 = \frac{4\pi\alpha}{T} \left(n_e + \sum_{\text{nuclei}} Z_j^2 n_j \right) \quad (5.1.11)$$

(n_e は電子数密度、 n_j は電荷 Z_j のイオン数密度.) 具体的な値は、

- 太陽： $(k_s/T)^2 \approx 12$ (全体で一定)
- low mass He burning stars: $(k_s/T)^2 \approx 2.5$ (コア)

単位体積あたりのエネルギー放出率

$$Q = \int \frac{d^3\mathbf{k}_\gamma}{(2\pi)^3} \frac{\omega \Gamma_{\gamma \rightarrow a}}{e^{\omega/T} - 1} = \frac{g_{a\gamma\gamma}^2 T^7}{4\pi} F(\kappa^2), \quad \kappa = \frac{k_S}{2T}. \quad (5.1.12)$$

ここで,

$$\begin{aligned} F(\kappa^2) &= \frac{\kappa^2}{2\pi^2} \int_0^\infty dx \left[(x^2 + \kappa^2) \ln \left(1 + \frac{x^2}{\kappa^2} \right) - x^2 \right] \frac{x}{e^x - 1} \\ &= \begin{cases} 0.98 & \kappa^2 = 2.5 \\ 1.84 & \kappa^2 = 12 \end{cases}. \end{aligned} \quad (5.1.13)$$

[Raffelt GG: "Plasmon decay into low mass bosons in stars", PRD37 (1988) 1356.]

全アクシオン光度

$$L_a = \int_0^R dr 4\pi r^2 \int_{\omega_{\text{pl}}}^\infty dE \frac{4\pi k^2}{(2\pi)^3} \frac{dk}{dE} 2E f_B \Gamma_{\gamma \rightarrow a} \quad (5.1.14)$$

§5.2

Solar axion

5.2.1 基本公式

地球での全アクシオン数フラックス

$$\Phi_a = \frac{R_\odot^3}{4\pi D_\odot^2} \int_0^1 dr 4\pi r^2 \int_{\omega_{\text{pl}}}^\infty dE \frac{4\pi k^2}{(2\pi)^3} \frac{dk}{dE} 2f_B \Gamma_{\gamma \rightarrow a} \quad (5.2.1)$$

地球でのエネルギースペクトル

$$\frac{d\Phi_a}{dE} = (6.0 \times 10^{10} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{keV}^{-1}) g_{10}^2 E^{2.481} e^{-E/1.205}. \quad (5.2.2)$$

ここで, E は keV 単位での数値, $g_{10} = g_{a\gamma\gamma} \times 10^{10} \text{GeV}$.

評価

- Axion flux: $\Phi_a = 3.75 \times 10^{11} g_{10}^2 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.
- Axion luminosity: $L_a = 1.85 \times 10^{-3} g_{10}^2 L_\odot$.
- Average energy: $\langle E \rangle = 4.2 \text{keV}$, $\langle E^2 \rangle = 22.7 \text{keV}^2$.
- Peak energy: 3.0keV .

5.2.2 制限

Helioseismology アクシオン放出による太陽構造変化が太陽振動に与える影響.

$$L_a \lesssim 0.20L_\odot \Rightarrow g_{a\gamma\gamma} \lesssim 1 \times 10^{-9} \text{GeV}^{-1}. \quad (5.2.3)$$

[Schlatt H, Weiss A, Raffelt G: "Helioseismological constraint on solar axion emission", *Astropart. Phys.*10(1999)353.[hep-ph/9807476]]

Solar ν flux 太陽の構造を維持するため, アクシオン放出があると, 太陽中心での全エネルギー生成率, したがって, 太陽中心温度は上昇する. これは, 太陽からのニュートリノ放出率を増大させる. 最新の太陽モデルでの ^8B ニュートリノフラックスについての予言は

$$F_{\nu,^8\text{B}} = (4.5 - 4.6) \times (1 \pm 0.16) \times 10^6 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}. \quad (5.2.4)$$

[Bahcall JN, Sereneli AM, Basu S: "New solar opacities, abundances, helioseismology, and neutrino fluxes", *ApJ*621(2005)L85.[astro-ph/0412440]].

観測値は

$$F_{\nu,^8\text{B}} = 4.94 \times (1 \pm 0.088) \times 10^6 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}. \quad (5.2.5)$$

これより,

$$L_a \lesssim 0.04L_\odot \Rightarrow g_{a\gamma\gamma} \lesssim 5 \times 10^{-10} \text{GeV}^{-1}. \quad (5.2.6)$$

[Ahmad QR et al (SNO Coll.): PRL89 (2002) 011301.[nucl-ex/0204008]; PRC72 (2005)055502.[nucl-ex/0502021]].

Helioscope experiment

- CAST

- $g_{a\gamma\gamma} < 1.16 \times 10^{-10} \text{GeV}^{-1}$ (95% CL) for $m_a \lesssim 0.02 \text{eV}$. [Zioutas K et al (CAST coll.): PRL94(2005)12301.[hep-ex/0411033]].
- $g_{a\gamma\gamma} < 8.8 \times 10^{-11} \text{GeV}^{-1}$ (95% CL) for $m_a \lesssim 0.02 \text{eV}$. [CAST Coll: JCAP 04:010 (2007)]
- $g_{a\gamma\gamma} \lesssim 2.3 \times 10^{-10} \text{GeV}^{-1}$ (95% CL) for $0.39 \text{eV} \lesssim m_a \lesssim 0.64 \text{eV}$. [Aune S et al (CAST coll.): PRL107(2011)261302.[arXiv:1106.3919[hep-ex]]].

§5.3

球状星団星からの放出

5.3.1 水平分枝星

HB星は、ヘリウムコア燃焼段階の軽い星に対応.

- コア質量: 約 $0.5M_{\odot}$
- エネルギー生成率 $\epsilon \sim 80 \text{ergg}^{-1}\text{s}^{-1}$
- コア平均密度: $\rho \sim 10^4 \text{gcm}^{-3}$
- コア平均温度: $T \sim 10^8 \text{K}$.

これより, コアからのアクシオンによるエネルギー放出率は

$$\epsilon_a \sim 30g_{10}^2 \text{ergg}^{-1}\text{s}^{-1}. \quad (5.3.1)$$

これにより HB ステージの寿命は

$$\frac{80}{80 + 30g_{10}^2} \quad (5.3.2)$$

倍に縮む.

15個の球状星団の観測より [Raffelt G1996B],

$$g_{a\gamma\gamma} < 10^{-10} \text{GeV}^{-1} \quad \text{for } m_a \lesssim 30 \text{keV}. \quad (5.3.3)$$

5.3.2 赤色巨星分枝星

RGB星は, 水素殻燃焼段階にある星で, 縮退したヘリウムコアをもつ.

- コア平均密度: $\rho \sim 10^6 \text{gcm}^{-3}$
- コア平均温度: $T \sim 10^8 \text{K}$.

アクシオンへの変換が有意に起きると, ρ, T および星の半径は減少し, 核反応率が低下する. これにより, He コア燃焼への移行が遅れる.

観測と理論の比較より, 光子以外へのエネルギー放出率 $\Delta\epsilon$ に対して,

$$\Delta\epsilon < 10 \text{ergg}^{-1}\text{s}^{-1} \quad \text{for } T = 10^8 \text{K}, \langle \rho \rangle = 2 \times 10^5 \text{gcm}^{-3}. \quad (5.3.4)$$

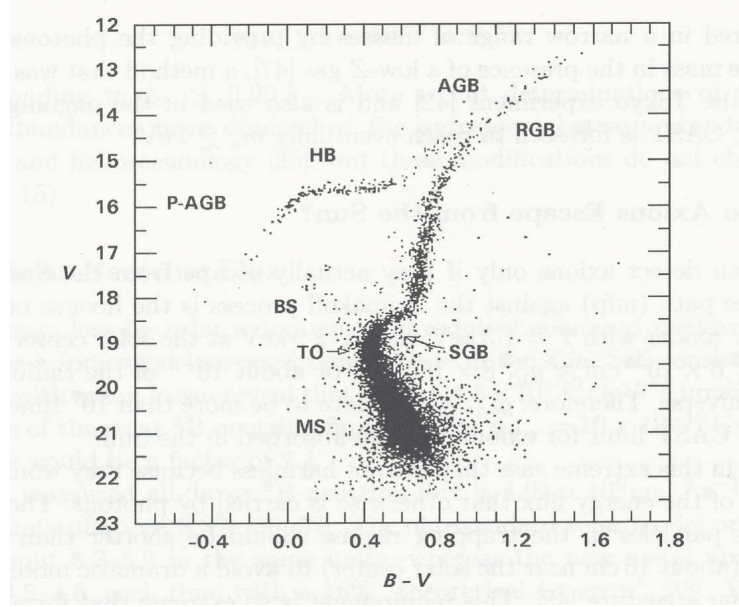


図 5.1: HR 図

また、ニュートリノの寄与は

$$\epsilon_\nu \approx 4 \text{ergg}^{-1} \text{s}^{-1} \quad (5.3.5)$$

一方、アクシオン制動放射



によるエネルギー放出率は

$$\epsilon_{a,\text{brems}} \approx 2 \times 10^{27} \alpha_{aee} \text{ergg}^{-1} \text{s}^{-1} \quad (5.3.7)$$

よって,

$$\alpha_{aee} < 0.5 \times 10^{-26} \Rightarrow g_{aee} < 3 \times 10^{-13} \text{GeV}^{-1}. \quad (5.3.8)$$

DFSZ 模型では

$$f_a / \cos^2 \beta > 0.8 \times 10^9 \text{GeV}, \quad (5.3.9a)$$

$$m_a \cos^2 \beta < 9 \text{meV}, \quad (5.3.9b)$$

$$g_{a\gamma\gamma} \cos^2 \beta < 1.2 \times 10^{-12} \text{GeV}^{-1}. \quad (5.3.9c)$$

($\tan \beta = v_1/v_2$).

§5.4

WD cooling

5.4.1 WD 光度関数

WD の光度関数の観測結果は，標準的な理論の予言と一致している．これより，WD cooling へのアクシオンの寄与が無視できる条件

$$\alpha_{aee} \lesssim 1 \times 10^{-26} \quad (5.4.1)$$

が得られる [Raffelt1996B].

5.4.2 ZZ Ceti stars

ZZ Ceti star は脈動不安定性をもつ WD で，その周期変化率 \dot{P}/P は冷却率に敏感である．G117-B15A の解析より，

$$\alpha_{aee} < 1.3 \times 10^{-27} \Leftrightarrow g_{aee} < 1.3 \times 10^{-13}. \quad (5.4.2)$$

DFSZ 模型では，これより

$$m_a \cos^2 \beta < 5 \text{meV}. \quad (5.4.3)$$

[Isern J, Garcia-Berro E: "White dwarf stars as particle physics laboratories", NPB suppl.114(2003)107.]

§5.5

SN1987A

5.5.1 高密度核物質からのアクシオン放出率

アクシオンと核子の相互作用は核スピンの依存し， $N + N \rightarrow N + N + a$ 過程は，スピンを変化させる NN 散乱でのみ起きる．このため，核スピンの時間相関情報が必要となる．

核子スピン時間相関構造関数を

$$S_\sigma(\omega, \mathbf{k}) = \frac{4}{3n_B} \int_{-\infty}^{+\infty} dt e^{i\omega t} \langle \boldsymbol{\sigma}(t, \mathbf{k}) \cdot \boldsymbol{\sigma}(0, -\mathbf{k}) \rangle \quad (5.5.1)$$

とおくと、アクシオンの吸収率と体積エネルギー放出率は次式で与えられる：

$$\Gamma_a = \left(\frac{C_N}{2f_a}\right)^2 \frac{n_B}{2} \omega S_\sigma(\omega, k), \quad (5.5.2a)$$

$$Q_a = \left(\frac{C_N}{2f_a}\right)^2 \frac{n_B}{4\pi^2} \int_0^\infty d\omega \omega^4 S_\sigma(\omega, k). \quad (5.5.2b)$$

ここで、 $k = |\mathbf{k}| \approx \omega$ はアクシオンの運動量.

S_σ が Lorentz 形で近似できるとすると、

$$S_\sigma(\omega) \approx \frac{\Gamma_\sigma}{\omega^2 + \Gamma_\sigma^2/4} s(\omega/T) \times \begin{cases} 1 & \text{for } \omega \geq 0, \\ e^{\omega/T} & \text{for } \omega < 0 \end{cases} \quad (5.5.3)$$

($s(\omega) = s(-\omega)$, $s(0) = 1$, $\epsilon_a = Q_a/\rho$ は

$$\epsilon_a = \left(\frac{C_N}{2f_a}\right)^2 \frac{T^4}{\pi^2 m_N} F = 3.0 \times 10^{37} C_N^2 \left(\frac{10^{10} \text{GeV}}{f_a}\right)^2 \left(\frac{T}{30 \text{MeV}}\right)^4 \text{Ferg/g} \quad (5.5.4)$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} F &= \int_0^\infty dx \frac{x^4 e^{-x}}{4} \frac{\Gamma_\sigma/T}{x^2 + (\Gamma_\sigma/2T)^2} s(x) \\ &\approx \frac{\Gamma_\sigma}{2T} \quad \text{for } \Gamma_\sigma/T \ll 1. \end{aligned} \quad (5.5.5)$$

一方、 Γ_σ は次のように評価される：

$$\Gamma_\sigma \approx \frac{1}{4} \Gamma_\sigma^{\text{OPE}} = \pi^{1/2} \alpha_\pi^2 \frac{n_B T^{1/2}}{m_N^5/2} = 450 \text{MeV} \left(\frac{\rho}{3 \times 10^{14} \text{gcm}^{-3}}\right) \left(\frac{T}{30 \text{MeV}}\right)^{1/2} \quad (5.5.6)$$

ここで、 $\alpha_\pi = (2fm_N/m_\pi)^2/(4\pi) \approx 15$. これより

$$1 \lesssim \Gamma_\sigma/T \lesssim 10. \quad (5.5.7)$$

5.5.2 ν バースト時間

アクシオンの相互作用が十分弱い場合 ($g_{aNN} < 10^{-9} \text{GeV}^{-1}$), 超新星爆発時でのアクシオン冷却はコアの温度低下を速め, その結果, ニュートリノバーストが観測される時間が減少する. モデル計算に基づく値と観測とに比較により, $\rho = 3 \times 10^{14} \text{gcm}^{-3}$, $T = 30 \text{MeV}$ に対し,

$$\epsilon_a \lesssim 1 \times 10^{19} \text{ergg}^{-1} \text{s}^{-1} \quad (5.5.8)$$

前節の計算より, KSVZ 模型に対して次の制限を得る：

$$f_a \gtrsim 4 \times 10^8 \text{GeV}, \quad m_a \lesssim 16 \text{meV}. \quad (5.5.9)$$

5.5.3 SN1987A gamma-ray flux (Solar Maximum Mission satellite)

一般に ALP に対して,

$$M > 3 \times 10^{11} \text{GeV} \quad \text{for } m < 10^{-9} \text{eV}. \quad (5.5.10)$$

- Grifolds JA, Masso E, Toldra R: "Gamma rays from SN1987A due to pseudoscalar conversion", PRL77(1996)2372.[astro-ph/9606028]
- Brockway JW, Carlson ED, Raffelt GG: "SN 1987A gamma-ray limits on the conversion of pseudoscalars", PLB383(1996)439.[astro-ph/9605197]

§5.6

磁場中でのアクシオン-光子変換

5.6.1 基礎方程式

- axion-photon coupling

$$\mathcal{L}_{\phi\gamma} = -g_{\phi\gamma}\phi\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}. \quad (5.6.1)$$

- Maxwell 方程式

$$\partial_t \mathbf{D} = c \nabla \times \mathbf{H} - 4\pi \mathbf{j}, \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi \rho, \quad (5.6.2a)$$

$$\partial_t \mathbf{B} = -c \nabla \times \mathbf{E}, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (5.6.2b)$$

- 運動方程式

$$\partial_t \rho_e + \nabla \cdot \mathbf{j}_e = 0, \quad (5.6.3a)$$

$$\partial_t \mathbf{j}_e = \frac{q}{m} \left(\rho_e \mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{j}_e \times \mathbf{B} \right), \quad (5.6.3b)$$

$$\ddot{\phi} - \Delta \phi + m_\phi^2 \phi = g_{\phi\gamma} \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}. \quad (5.6.3c)$$

ここで,

$$\rho_e = q \delta n_e, \quad \rho = \rho_e + \frac{g_{\phi\gamma}}{4\pi} \nabla \phi \cdot \mathbf{B}, \quad (5.6.4a)$$

$$\mathbf{j}_e = q n_e \mathbf{v}, \quad \mathbf{j} = \mathbf{j}_e - \frac{g_{\phi\gamma}}{4\pi} \left(\nabla \phi \times \mathbf{E} + \dot{\phi} \mathbf{B} \right). \quad (5.6.4b)$$

摂動方程式

- 背景磁場: $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \delta\mathbf{B}$.
- 誘電率と透磁率: $\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E}$, $\mathbf{H} = \mu^{-1}\mathbf{B}$.
- Fourier モード

$$\rho_e, \mathbf{j}_e, \mathbf{E}, \mathbf{B}, \phi \propto \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}). \quad (5.6.5)$$

- 線形摂動方程式

$$\epsilon\partial_t^2\mathbf{E} = -c^2\nabla \times (\mu^{-1}\nabla \times \mathbf{E}) - 4\pi\partial_t\mathbf{j}, \quad (5.6.6a)$$

$$\partial_t\mathbf{j}_e = \frac{q}{m} \left(\rho_e\mathbf{E} + \frac{1}{c}\mathbf{j}_e \times \mathbf{B}_0 \right). \quad (5.6.6b)$$

- small mass 近似: $\mathbf{E}, \mathbf{j}_e \propto \exp(-i\omega t + ikz)$ として, \mathbf{j}_e の式を解いて,

$$4\pi(\omega^2 - \omega_g^2)\mathbf{j}_e = \omega_p^2 \left\{ i\omega\mathbf{E} - \omega_g\mathbf{E} \times \mathbf{b} - i\frac{\omega_g^2}{\omega}(\mathbf{E} \cdot \mathbf{b})\mathbf{b} \right\}. \quad (5.6.7)$$

ここで, $\mathbf{B}_0 = B_0\mathbf{b}$,

$$\omega_g = \frac{qB_0}{cm}, \quad (5.6.8a)$$

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi n_e q^2}{m}. \quad (5.6.8b)$$

また,

$$\partial_t\mathbf{j}_\phi = -\frac{g\phi\gamma}{4\pi}\omega\phi(\mathbf{k} \times \mathbf{E} - \omega\mathbf{B}) \simeq \frac{g\phi\gamma}{4\pi}\omega^2 B_0\phi. \quad (5.6.9)$$

よって, 摂動方程式は

$$\begin{aligned} \epsilon\partial_t^2\mathbf{E} &= \mathbf{k} \times (\mu^{-1}\mathbf{k} \times \mathbf{E}) - \frac{\omega_p^2\omega^2}{\omega^2 - \omega_g^2}\mathbf{E} \\ &+ \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_g^2} \left\{ i\omega\omega_g\mathbf{E} \times \mathbf{b} + \omega_g^2(\mathbf{E} \cdot \mathbf{b})\mathbf{b} \right\} - g\omega^2\phi\mathbf{B}_0, \end{aligned} \quad (5.6.10)$$

$$\partial_t^2\phi = -(k^2 + m_\phi^2)\phi + g\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}_0. \quad (5.6.11)$$

5.6.2 伝播方程式

波の伝搬方向を z として, 伝搬速度が光速に近く, $|\omega/k - c|/c \ll 1$ のとき,

$$(\partial_t^2 - \partial_z^2)X(t, z) = (\partial_t - \partial_z)(\partial_t + \partial_z)X \simeq -2ik(\partial_t + \partial_z)X = -2ik\frac{dX}{dz} \quad (5.6.12)$$

となるので、2階の発展方程式は、近似的に伝搬に沿った1階の方程式で近似される：

$$\left(-i\frac{d}{dz} - \mathcal{M}\right) \begin{pmatrix} A_{\perp} \\ A_{\parallel} \\ \phi \end{pmatrix} = 0; \quad \mathcal{M} = \begin{pmatrix} \Delta_{\perp} & \Delta_R & 0 \\ \Delta_R & \Delta_{\parallel} & \Delta_B \\ 0 & \Delta_B & \Delta_a \end{pmatrix} \quad (5.6.13)$$

ここで、

$$\Delta_{\perp} = \Delta_{\text{pl}} + \Delta_{\text{CM}}^{\perp}, \quad \Delta_{\parallel} = \Delta_{\text{pl}} + \Delta_{\text{CM}}^{\parallel}, \quad \Delta_{\text{pl}} = \omega_{\text{pl}}^2/(2E) \quad (5.6.14a)$$

$$\Delta_B = g_{a\gamma} B_t/2, \quad \Delta_a \simeq m_a^2/(2E), \quad (5.6.14b)$$

$$\omega_{\text{pl}} = \sqrt{\frac{4\pi\alpha n_e}{m_e}}. \quad (5.6.14c)$$

Δ_R は Faraday 回転, Δ_{CM} は Cotton-Mouton 効果を表す.

2成分近似 Farady 回転を無視したとき、

$$\begin{pmatrix} \Delta_{\parallel} & \Delta_B \\ \Delta_B & \Delta_a \end{pmatrix} = R(\theta)[\lambda_1, \lambda_2]R(-\theta) \quad (5.6.15)$$

\Leftrightarrow

$$\lambda_1 + \lambda_2 = \Delta_{\parallel} + \Delta_a, \quad (5.6.16)$$

$$(\lambda_1 - \lambda_2) \cos(2\theta) = \Delta_{\parallel} - \Delta_a, \quad (5.6.17)$$

$$(\lambda_1 - \lambda_2) \sin(2\theta) = 2\Delta_B. \quad (5.6.18)$$

と対角化すると、

$$\begin{pmatrix} A_{\parallel}(z) \\ \phi(z) \end{pmatrix} = R(\theta) \begin{pmatrix} e^{i\lambda_1 z} & 0 \\ 0 & e^{i\lambda_2 z} \end{pmatrix} R(-\theta) \begin{pmatrix} A_{\parallel}(0) \\ \phi(0) \end{pmatrix}. \quad (5.6.19)$$

ここで、

$$\lambda = \frac{1}{2} \{ \Delta_{\parallel} + \Delta_a \pm \Delta_{\text{osc}} \}; \quad \Delta_{\text{osc}}^2 = (\Delta_{\parallel} - \Delta_a)^2 + 4\Delta_B^2 \quad (5.6.20)$$

これらの固有値の gB への依存性は、図 5.2 の左図に示したようになる。また、対応する固有ベクトルの振る舞いは、図 5.2 の右図を用いると理解できる。特に、 $g|B|E \gg m_a^2$ では、

$$\mathbf{e}_1 \approx \frac{1}{\sqrt{2}}(\mathbf{e}_a + \mathbf{e}_{\gamma}), \quad \mathbf{e}_2 \approx \frac{1}{\sqrt{2}}(-\mathbf{e}_a + \mathbf{e}_{\gamma}) \quad (5.6.21)$$

となり混合は極大となる。

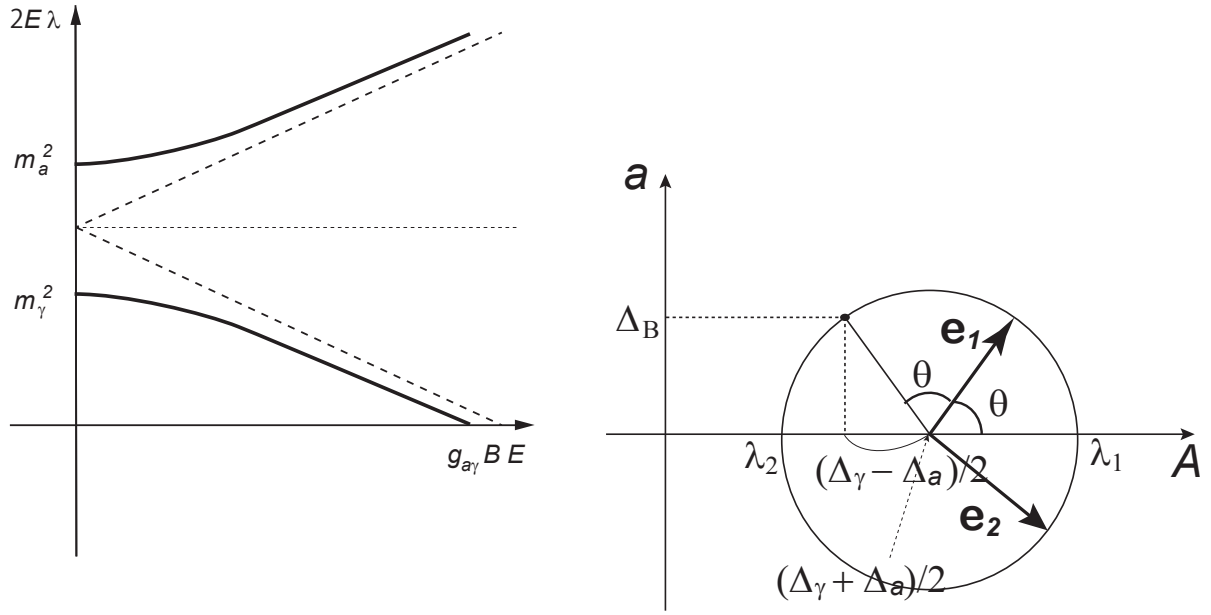


図 5.2: 磁場によるアクシオンと光子の混合

非共鳴遷移

$$P_{\gamma \rightarrow a} = P_0 := \sin^2(2\theta) \sin^2 \frac{s \Delta_{\text{osc}}}{2} = \frac{4\Delta_B^2}{\Delta_{\text{osc}}^2} \sin^2 \frac{s \Delta_{\text{osc}}}{2} \quad (5.6.22)$$

ここで,

$$\Delta_{\text{osc}} = (\Delta_{\text{CM}} + \Delta_{\text{pl}} - \Delta_a)^2 + 4\Delta_B^2. \quad (5.6.23)$$

CM 項が無視できる場合には,

$$P_0 = \frac{1}{1 + (E_*/E)^2} \sin^2 \left(g_{a\gamma} B_t \left[1 + (E_*/E)^2 \right]^{1/2} \frac{s}{2} \right), \quad (5.6.24)$$

$$E_* := \frac{|m_a^2 - \omega_{\text{pl}}^2|}{2g_{a\gamma} B_t} \simeq 2.6 \frac{|m_a^2 - \omega_{\text{pl}}^2|}{(10^{-10} \text{eV})^2} \left(\frac{10^{-9} \text{G}}{B_t} \right) \left(\frac{g_{a\gamma}^{-1}}{10^{10} \text{GeV}} \right) \text{GeV} \quad (5.6.25)$$

共鳴遷移

$$2\pi |\Delta'_{\text{pl}} + \Delta'_{\text{CM}}| \lesssim \Delta_B^2 \Rightarrow P_{\gamma \rightarrow a} = O(1) \quad (5.6.26)$$

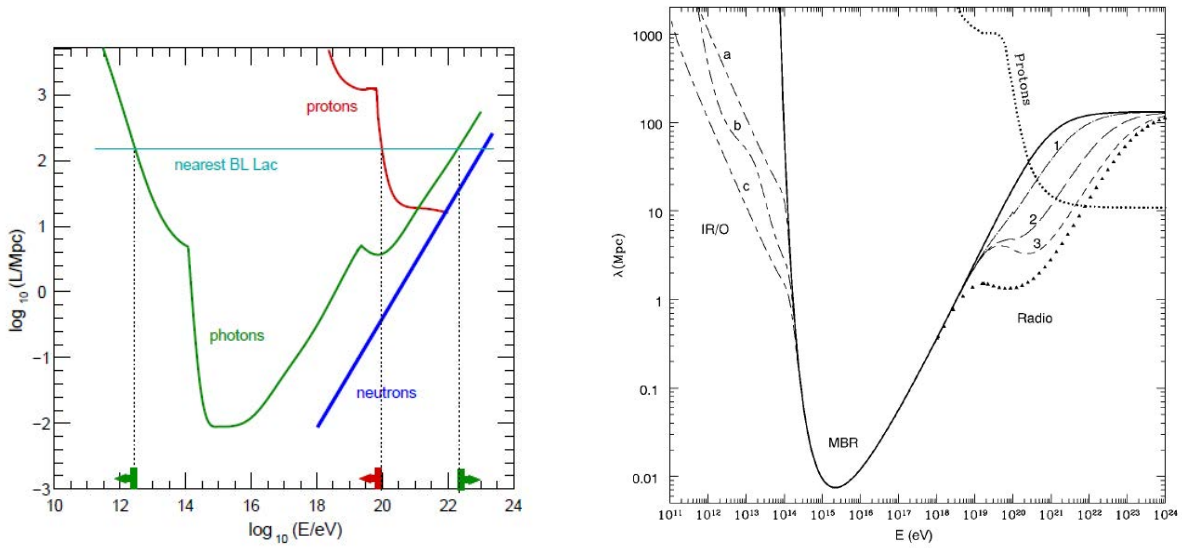


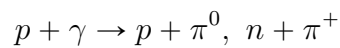
図 5.3: 光子および宇宙線に対する宇宙の透明度

§5.7

高エネルギーガンマ線への影響

5.7.1 Gamma 線ホライズン

高エネルギー宇宙線は、エネルギー E が $E_{GZK} \sim 5 \times 10^{19} eV$ を超えると、CMB 光子と反応して π 中間子を作り、急速にエネルギーを失う：



このため、 $E > E_{GZK}$ の宇宙線が伝搬できる距離は E と共に急速に短くなる。

同様に、高エネルギーガンマ線は、電磁背景放射との相互作用により、電子・陽電子対生成を起こす様になると、伝搬距離は短くなる：

$$\omega_{HE\gamma} \geq \frac{2.5 \times 10^{11} eV^2}{\omega_{BG\gamma}} \Rightarrow \gamma + \gamma \rightarrow e + e^+. \quad (5.7.1)$$

ただし、伝搬距離は各振動数での背景放射のエネルギー密度に大きく依存する (図 5.3)。

AGN のガンマ線スペクトルの観測から、ガンマ線に対する宇宙の透明度が実際に測られるようになっている：

- HESS observation: power-law fitting

Fig. 1. Measurement, at the 68 and 95% confidence levels (including systematic uncertainties added in quadrature), of the opacity $\tau_{\gamma\gamma}$ from the best fits to the Fermi data compared with predictions of EBL models. The plot shows the measurement at $z \approx 1$, which is the average redshift of the most constraining redshift interval (i.e., $0.5 \leq z < 1.6$). The Fermi-LAT measurement was derived combining the limits on the best-fit EBL models. The downward arrow represents the 95% upper limit on the opacity at $z = 1.05$ derived in (13). For clarity, this figure shows only a selection of the models we tested; the full list is reported in table S1. The EBL models of (49), which are not defined for $E \geq 250/(1+z)$ GeV and thus could not be used, are reported here for completeness.

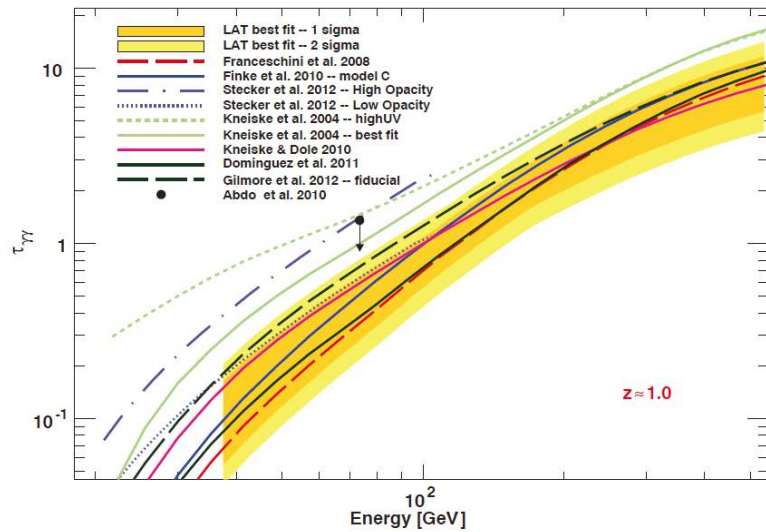


図 5.4: Blazar からのガンマ線に対する宇宙の透明度 (FermiLAT)

Two blazars with strong absorption were observed.

- Fermi-LAT observation: power-law fitting [Ackermann et al (Fermi Coll): Science 338, 1190 (2012)]

The spectral deformation due to absorption has been observed for 150 blazars of BL Lac type. ($z = 0.03 - 1.6, E = 40\text{GeV} - 100\text{GeV}$)

- Multi-frequency observation: synchrotron/SSC model [Dominguez et al: apj770, 88 (2013)]

Opacity around a TeV range is determined by observations of 15 blazars from radio to Gamma-ray (Fermi-LAT & IACTs).

The opacity is consistent with the minimum EBL model. ($z = 0.031 - 0.5, E = 200\text{GeV} - 10\text{TeV}$)

5.7.2 CIRB 問題

従来から、赤外線背景放射の直接観測は、銀河からの寄与の総和に対する推定値より大きな値を与える傾向にあった。最近、この傾向が $1\mu\text{m}$ より短い波長帯でも続くのかどうかを検証するためのロケット実験 (CIBER 実験) が行われ、銀河起源の EBL の 2 倍以上の観測値を得ている。

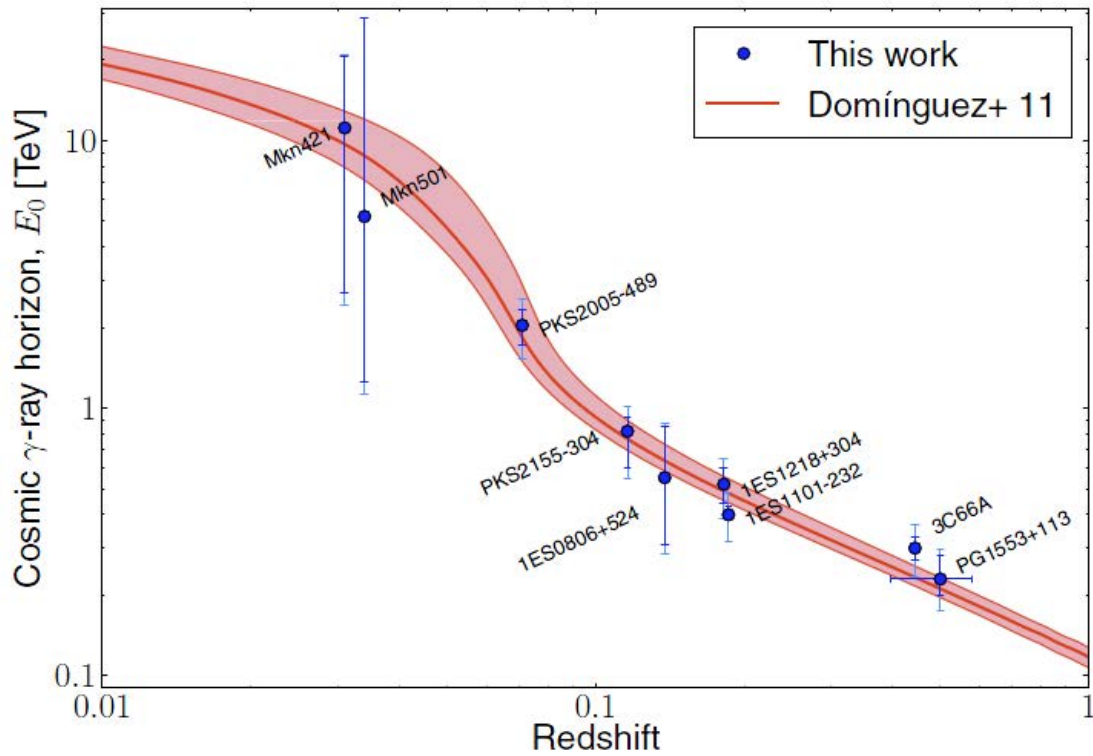


Figure 2. Estimation of the CGRH from every blazar in our sample plotted with blue circles. The statistical uncertainties are shown with darker blue lines and the statistical plus 20% of systematic uncertainties are shown with lighter blue lines. The CGRH calculated from the EBL model described in Domínguez et al. (2011a) is plotted with a red thick line. The shaded regions show the uncertainties from the EBL modeling, which were derived from observed data. (A color version of this figure is available in the online journal.)

図 5.5: Blazar からのガンマ線に対する宇宙の透明度 (Synchrotron/SSC model)

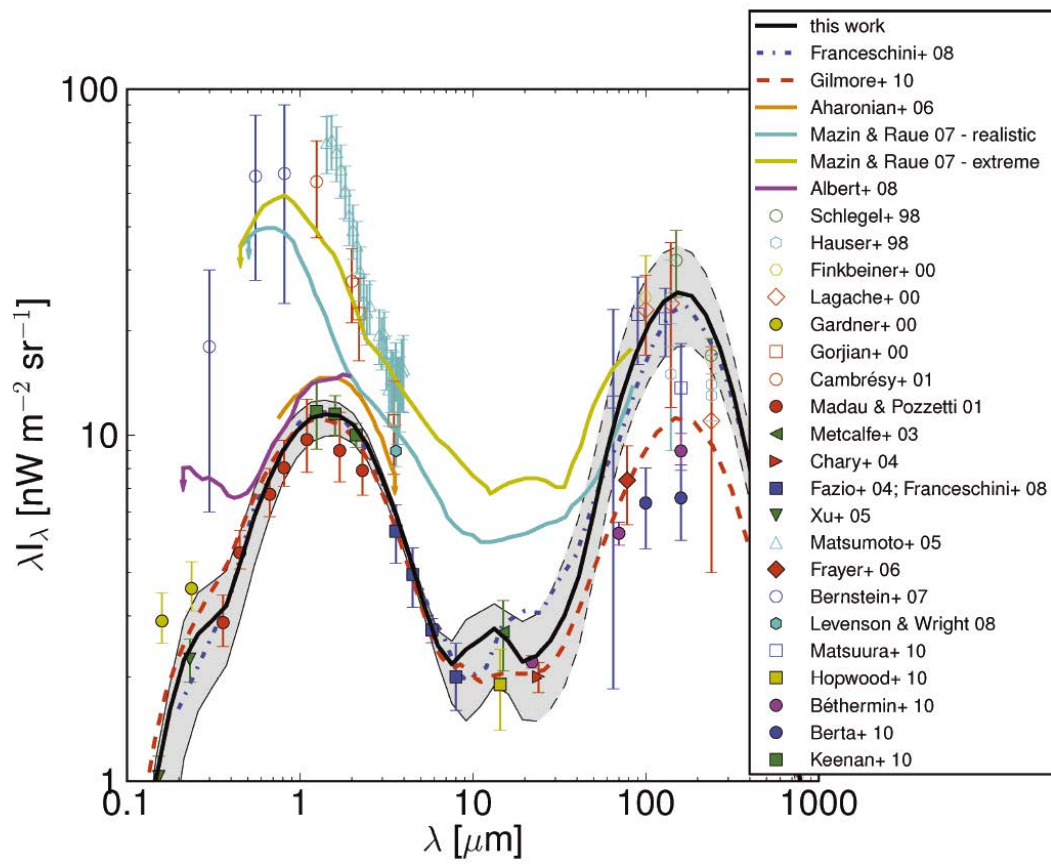


図 5.6: EBL の観測値

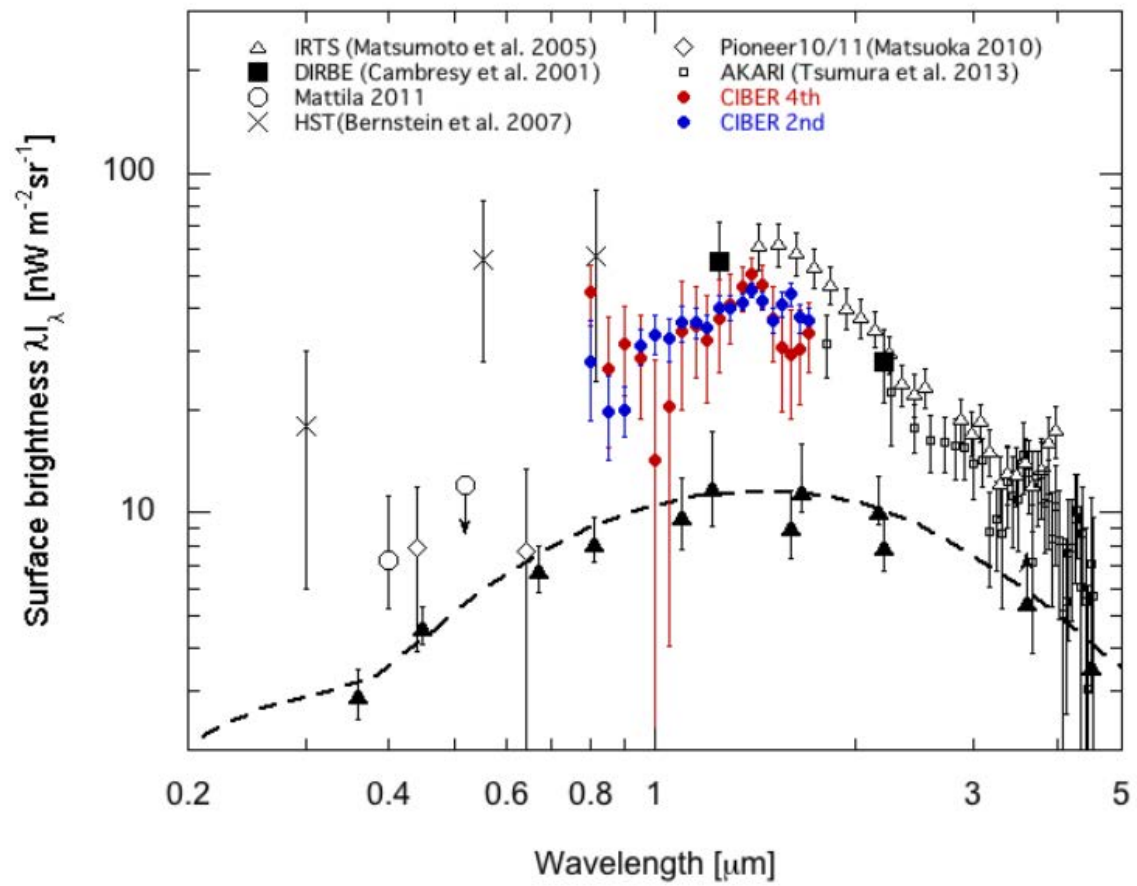


図 5.7: CIBER 実験で得られた赤外線背景放射スペクトル

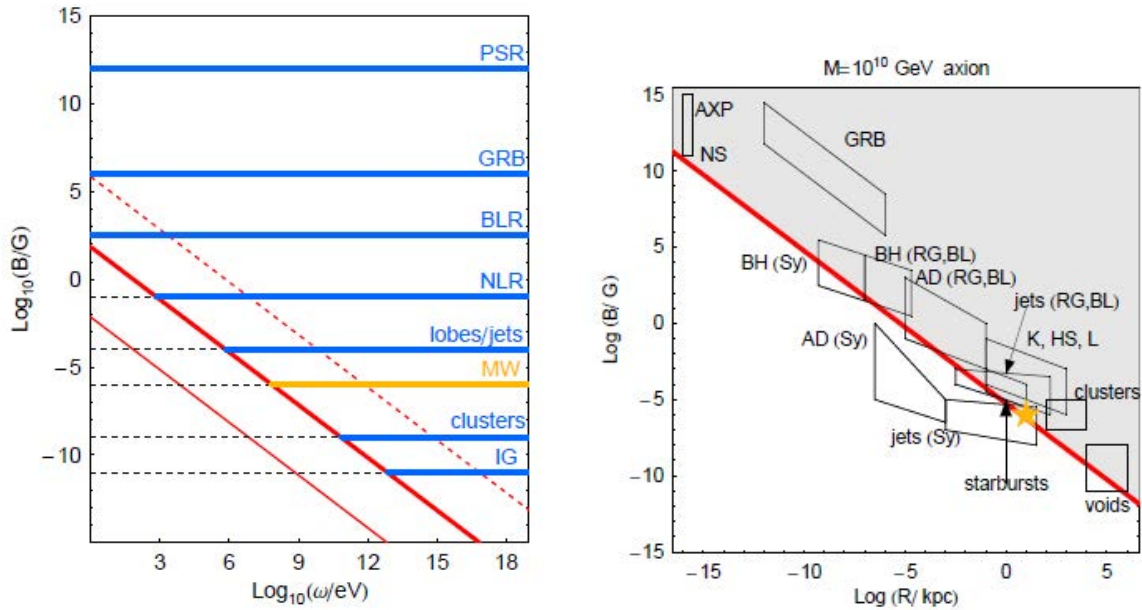


図 5.8: 強いアクシオン・光子混合が起きるための条件

5.7.3 観測可能性

Fermi 衛星 エネルギーが $E = 100\text{GeV} \sim 1\text{TeV}$, 質量が $10^{-6} \sim 10^{-8}\text{eV}$, $g_{a\gamma} \sim 10^{-10}\text{GeV}^{-1}$ のとき, 次の条件が満たされるなら, γ 線スペクトルが 10%程度変形を受ける:

- 銀河間磁場: $L \sim 1\text{Mpc}$, $B = (1 - 5) \times 10^{-9}\text{G}$, $D = 200 \sim 500\text{Mpc}$
- 銀河団磁場: $L \sim 10\text{kpc}$, $B = 10^{-6}\text{G}$, $n_e \simeq 10^{-3}\text{cm}^{-3}$, $D = 1\text{Mpc}$
- 銀河磁場: $L \sim 10\text{kpc}$, $B = (2 - 4) \times 10^{-6}\text{G}$, $n_e \simeq 10^{-3}\text{cm}^{-3}$, $D = 1\text{Mpc}$.

[De Angelis A, Mansutti O, Roncadelli M:Phys.Lett. B659 (2008) 847-855 [arXiv:0707.2695 [astro-ph]]]

強い混合が起きるための条件

- Near resonance

$$E \gtrsim E_* \Rightarrow g_{a\gamma} \cdot 10^{11}\text{GeV} \gtrsim 0.7 \left(\frac{m_a}{10^{-7}\text{eV}} \right)^2 \frac{1}{B_{10\mu\text{G}} E_{\text{TeV}}} \quad (5.7.2)$$

- 十分な振動

$$g_{a\gamma} B L \gtrsim \pi \Rightarrow g_{a\gamma} \cdot 10^{11}\text{GeV} \gtrsim 0.3 \frac{1}{B_{10\mu\text{G}} L_{10\text{kpc}}} \quad (5.7.3)$$

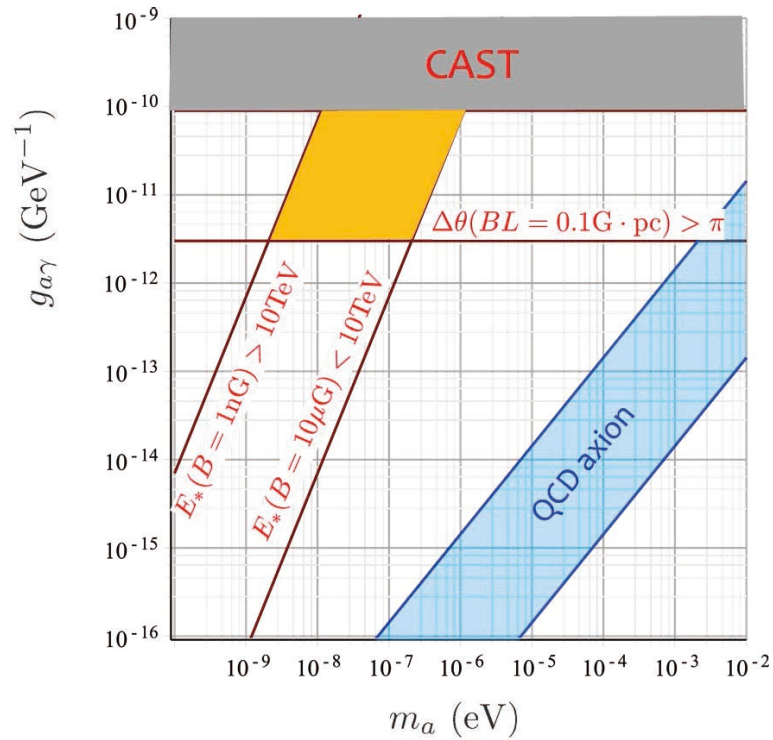


図 5.9: CIBER 実験で得られた axion パラメータへの制限

観測から得られた制限

- VHE γ 線 ($> 100\text{GeV}$) での宇宙の透明度. 26 個の高エネルギー天体の不透明波長帯を観測. [Meyer M, Horns D, Raue M: arXiv:1302.1208]

$$g_{a\gamma} \gtrsim 10^{-11}\text{GeV}^{-1} : \quad 10^{-10}\text{eV} < m_a < 10^{-7}\text{eV}. \quad (5.7.4)$$

- VHE γ 線源のスペクトルがもつ乱雑さをアクシオン・光子変換に作用する磁場の乱雑さに起因するとした場合の制限 [Brun P, Wouters D (HESS Collaboration): arXiv: 1307.6068]

$$g_{a\gamma} \lesssim 5 \times 10^{-11}\text{GeV}^{-1} : \quad 10^{-9}\text{eV} < m_a < 10^{-7}\text{eV}. \quad (5.7.5)$$

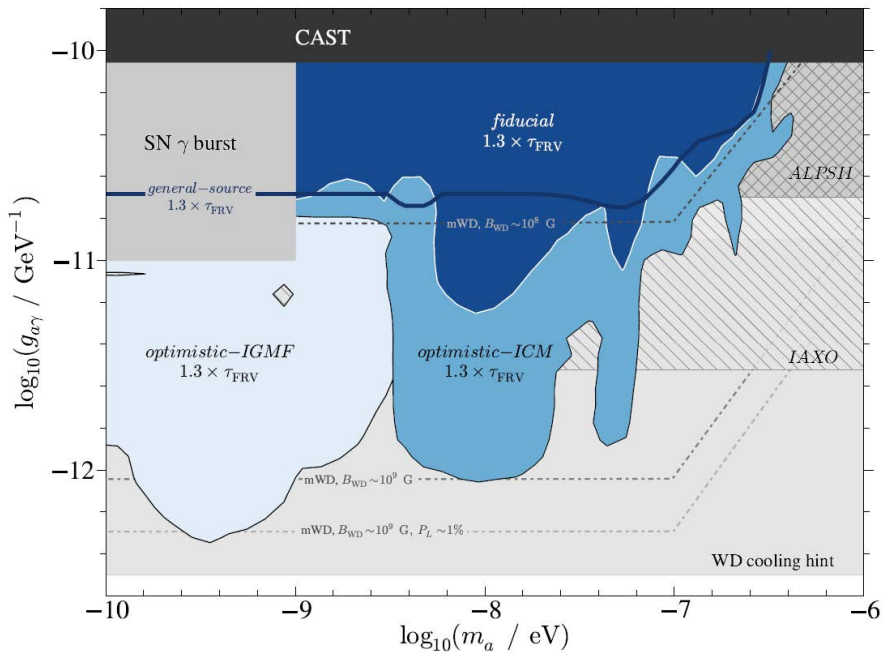


図 5.10: VHE γ 線に対する透明度より得られた $g_{a\gamma}$ への下限 [Meyer M, Horns D, Raue M: arXiv:1302.1208]

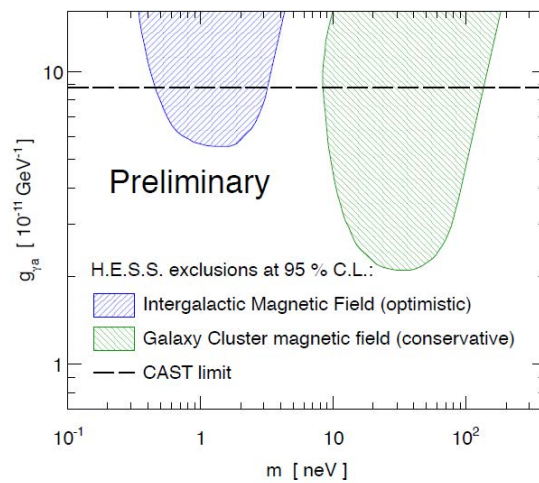


図 5.11: HESS により観測された BL Lac PKS 2155-304 の γ 線スペクトルの不規則性より得られた $g_{a\gamma}$ への制限 [Brun P, Wouters D (HESS Collaboration): arXiv: 1307.6068]

6

一様等方宇宙モデル

§6.1

基本観測情報

6.1.1 Hubble の法則

● 変光星の光度・周期関係

- Henrietta Swan Leavitt: 小マゼラン星雲内の 25 個の Cepheid 型変光星 (1912) [H.S. Leavitt, Edward C. Pickering: Harvard Observatory Circular 173: 1-3 (1912)]

絶対等級 $M = -a \log P + b$

現在の公式は

$$\langle M_V \rangle = -3.53 \log P + 2.13(\langle B_0 \rangle - \langle V_0 \rangle) + f \quad (6.1.1)$$

ここで, $f \sim -2.25$ はゼロポイント. 周期 P は日単位.

- H. Shapley: 球状星団の RR Lyrae 型変光星 (1916)・銀河ハロー内の球状星団分布 (1918)

● 遠方の銀河の後退運動

- Vest M. Slipher: 系外銀河からの光のドップラー偏移の発見 (1912-)

● 銀河の距離測定

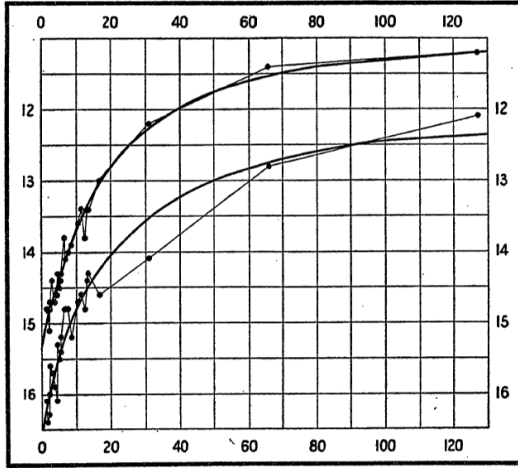


FIG. 1.

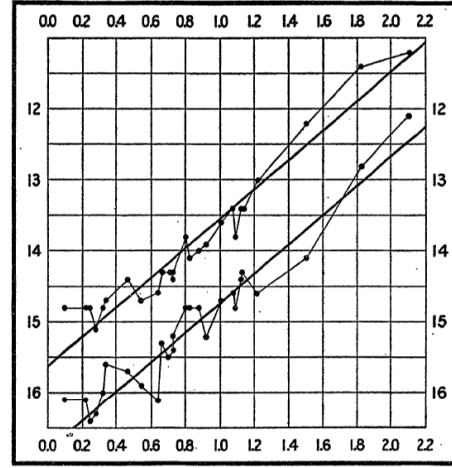


FIG. 2.

図 6.1: Leavitt が 25 個の Cepheid 型変光星の観測より導いた光度・周期関係

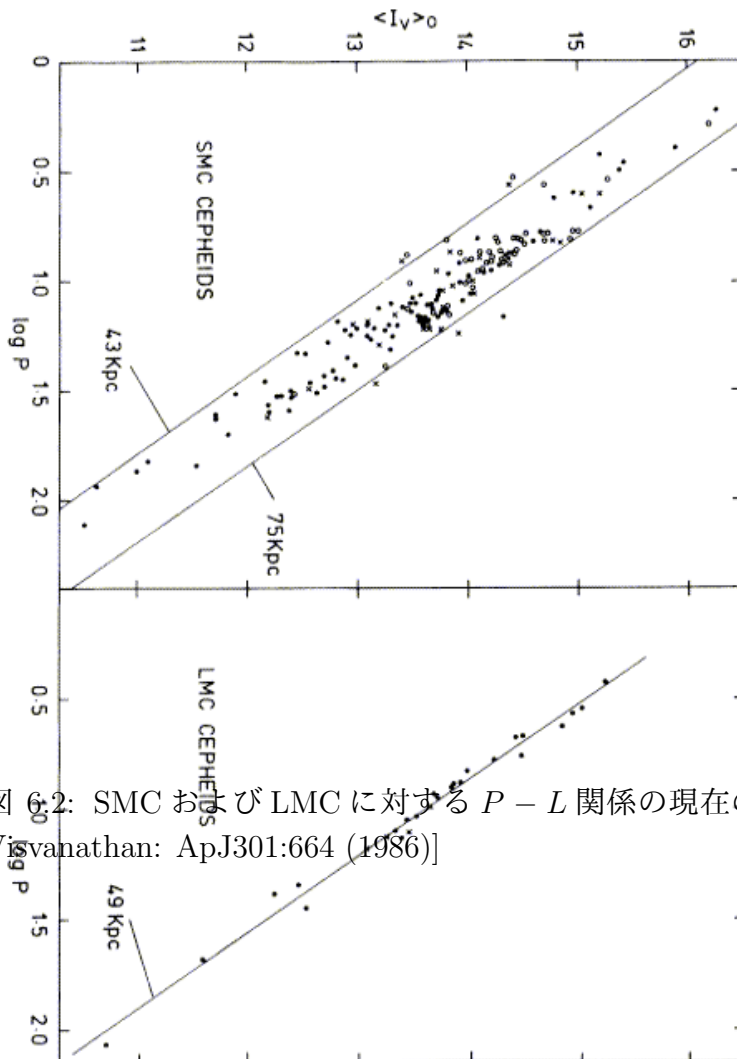


図 6.2: SMC および LMC に対する $P - L$ 関係の現在の観測 [Mathewson, Ford, Visvanathan: ApJ301:664 (1986)]

- Edwin Powell Hubble (1889-1953): Wilson 山天文台 2.5m 反射望遠鏡による遠距離天体観測
変光星によるアンドロメダ銀河の距離決定
- Cepheid 法による 24 個の銀河 (2Mpc 以内) について距離と後退測度を決定 [E. Hubble: ApJ64, 321 (1926)].

- Hubble の法則

- G. Lemaitre (1926), E. P. Hubble (1929)

$$v = H_0 d : H_0 \approx 500 \text{km/s/Mpc} \Rightarrow 70 \text{km/s/Mpc} \quad (6.1.2)$$

[G. Lemaitre: Ann. Soc. Sci. Brux. 47A, 49 (1927); E.P. Hubble: Proc. Nat. Acad. Sc. (USA) 15, 168-73 (1929)].

Hubble の法則は, 宇宙の膨張とともに, 宇宙の空間的一様等方性を意味する.

$$\mathbf{v} = H_0 \mathbf{r} \Rightarrow \mathbf{v}' = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0 = H_0(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) = H_0 \mathbf{r}'. \quad (6.1.3)$$

また, H_0 は宇宙年齢の目安となる:

$$1/H_0 = 14 \text{Gyr} h_{70}^{-1} \quad (6.1.4)$$

6.1.2 宇宙の銀河地図

Galaxy redshift survey Hubble の法則を逆に用いると, 赤方偏移を距離の目安として使うことができる.

$$d = \frac{v}{H_0} = z \frac{c}{H_0} = z \cdot 4300 h_{70}^{-1} \text{Mpc} \quad (6.1.5)$$

宇宙の銀河地図を見ると, 100Mpc 以下 ($\Delta z < 0.025$) では銀河の分布は決して一様でなく, 特徴的な cell/filament-void 構造を持っている. また, 200Mpc 以上のスケールでも一様性は明確でない. しかし, 相関関数を求めてみると, 「統計的等方性」が浮かび上がる.

銀河の数密度 n を統計的変数と見たとき, その 2 点での相関関数

$$\xi(\mathbf{r}) = \langle (n(\mathbf{x} + \mathbf{r}) - n_0)(n(\mathbf{x}) - n_0) \rangle \quad (6.1.6)$$

は, 銀河分布が統計的に一様なら, \mathbf{x} によらず, \mathbf{r} のみに依存す. さらに, 統計的に等方なら, $r = |\mathbf{r}|$ にのみ依存する. また, 大きなスケールで一様なら, $\xi(r)$ は r が大きいときにゼロに近づく.

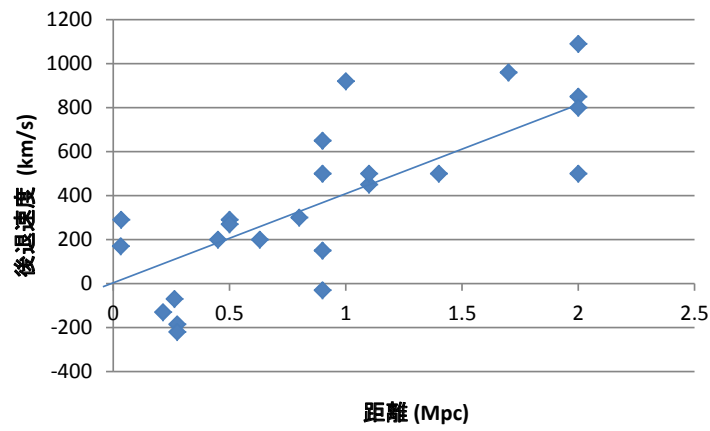


図 6.3: Hubble と Humason が 1929 年に発表した 24 個の銀河に対する距離と後退速度の相関図. [Hubble E, Humason (1929)]

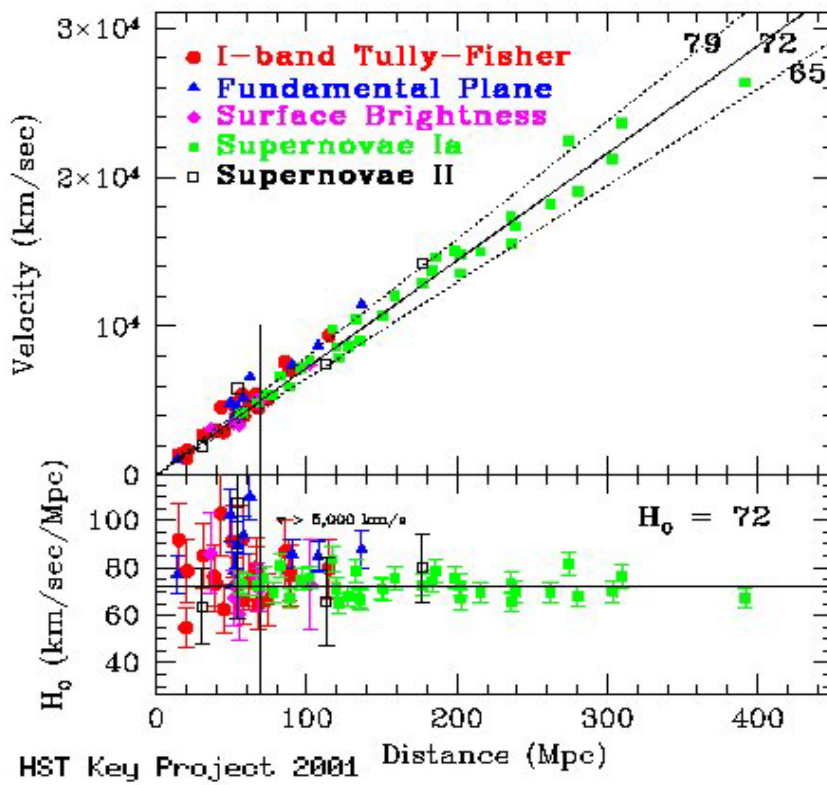


図 6.4: 現在の Hubble ダイアグラム

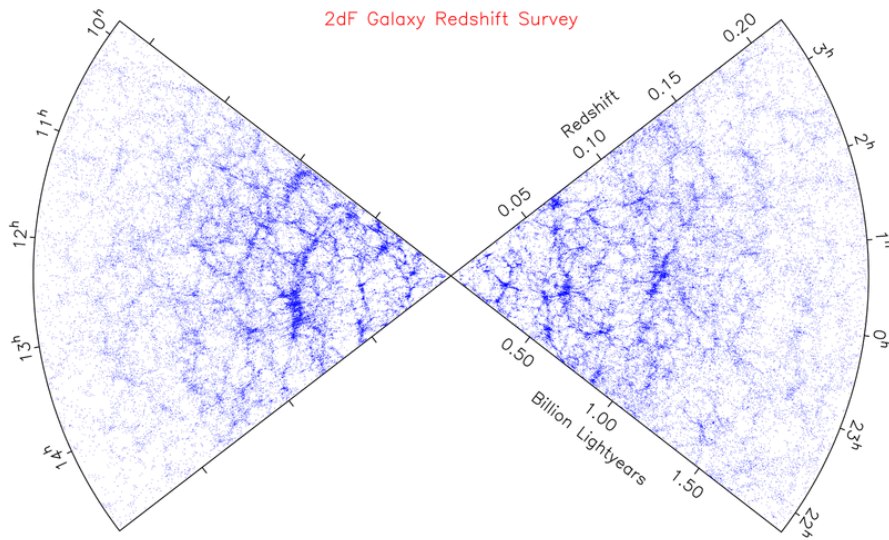


図 6.5: 2dF サーベイによる宇宙地図 [出典: 2dFGRS ホームページ <http://www2.aao.gov.au/TDFgg/>]

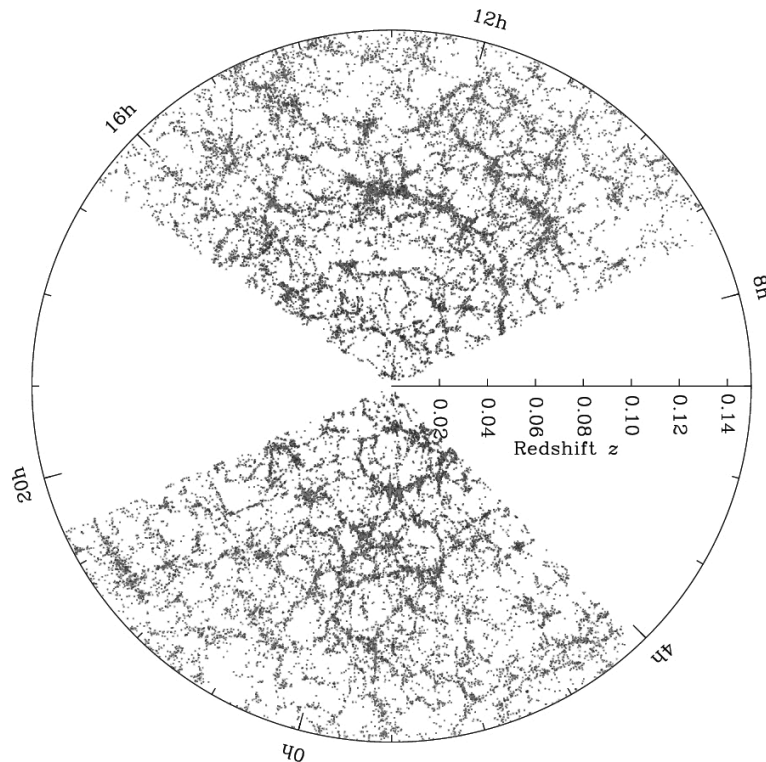


図 6.6: SDSS による宇宙地図 [出典: <http://www.sdss.org/legacy/> ©Michael Bolton and the SDSS]

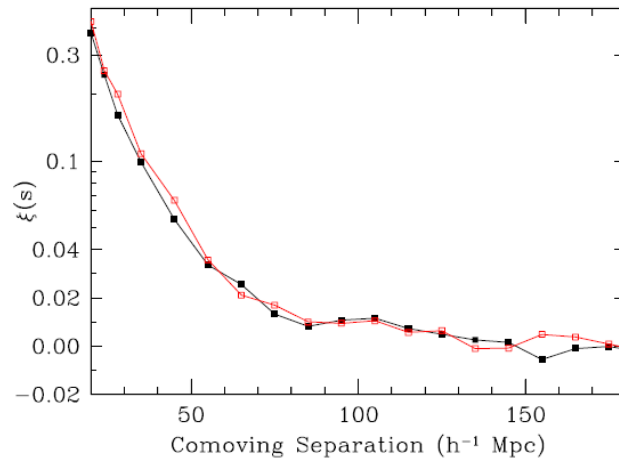


FIG. 4.— The correlation function for two different redshift slices, $0.16 < z < 0.36$ (filled squares, black) and $0.36 < z < 0.47$ (open squares, red). The latter is somewhat noisier, but the two are quite similar and both show evidence for the acoustic peak. Note that the vertical axis mixes logarithmic and linear scalings.

図 6.7: SDSS により得られた明るい銀河 (LRG) の相関関数. $0.16 < z < 0.47$

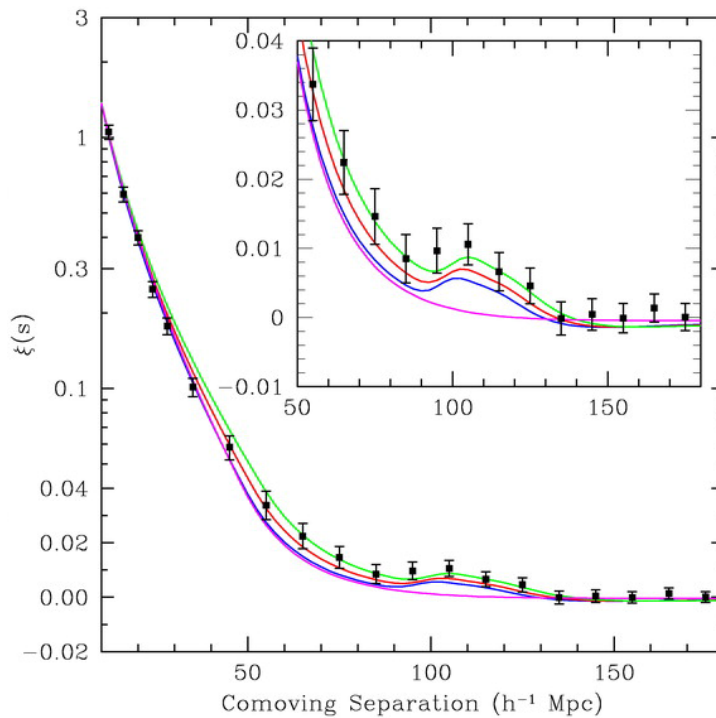


図 6.8: BAO シグナル. 実線は宇宙パラメーター $\Omega_m h^2 = 0.12$ (top), 0.13 (second), 0.14 (third), $\Omega_b h^2 = 0.024$, $n_s = 0.98$ に対応する宇宙モデルの予言. 最下線は, BAO のない CDM モデル ($\Omega_m h^2 = 0.105$). [Eisenstein D et al (SDSS collaboration) ApJ. 633, 560 (2005)]

プロジェクト名	期間	有効立体角	銀河数
CfA	1977-1982		
CfA2	1985-1995	34% (北天)	18,000 個
SSRS	-1998?	13% (南天)	5,400 個
LCRS	1987-1997	1.7% (南北銀河極近傍)	26,000 個
2dFGRS	1996-2003	3.6% (南天)	220,000 個
6dFGRS	2001-2006	(南天)	150,000 個
SDSSI	2000-2005	19% (主に北天)	657,000 個
SDSSII	2005-2008	20% (主に北天)	790,000 個

表 6.1: 銀河赤方偏移サーベイ

6.1.3 宇宙背景放射

宇宙全体に広く分布する明るい天体，銀河，さらに宇宙初期からの放射の等方性は，その源の分布の等方性をみる目安となる．一般に，源の共動座標での数密度を $n(\chi, \Omega)$ とするとき，各方向から来る放射の強度は

$$I_\omega(\Omega)d\omega = \int_0^\infty d\chi \chi^2 f(\chi) n(\chi, \Omega; t(\chi)) W_{\omega'}(\chi, t_\chi) \frac{L_{\omega'}(\chi, \Omega; t(\chi)) d\omega'}{4\pi d_L(\chi)^2} \quad (6.1.7)$$

で与えられる．ここで， $\omega' = (1+z)\omega$ は源での放射の振動数， $f(\chi)$ は空間曲率で決まる関数， d_L は光度距離（後述）， $W_\omega(\chi, t)$ は減衰因子である．

一般に，方向 Ω に依存したフラックス $I(\Omega)$ に対して，その平均からのずれ δI は球面調和関数を用いて

$$\delta I(\Omega) = \sum_{l=0}^\infty \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_l^m(\Omega) \quad (6.1.8)$$

と展開される．輻射強度が統計的に等方的なら， a_{lm} を確率変数として扱うとき，その相関は

$$\langle a_{lm} a_{l'm'}^* \rangle = C_l \delta_{ll'} \delta_{mm'} \quad (6.1.9)$$

と表される．このとき，輻射強度の非等方性は

$$\sum_{m=-l}^l Y_l^m(\Omega_1) Y_l^{m*}(\Omega_2) = \frac{2l+1}{4\pi} P_l(\Omega_1 \cdot \Omega_2) \quad (6.1.10)$$

より，

$$\langle \delta I(\Omega_1) \delta I(\Omega_2) \rangle = \sum_l \frac{2l+1}{4\pi} C_l P_l(\Omega_1 \cdot \Omega_2). \quad (6.1.11)$$

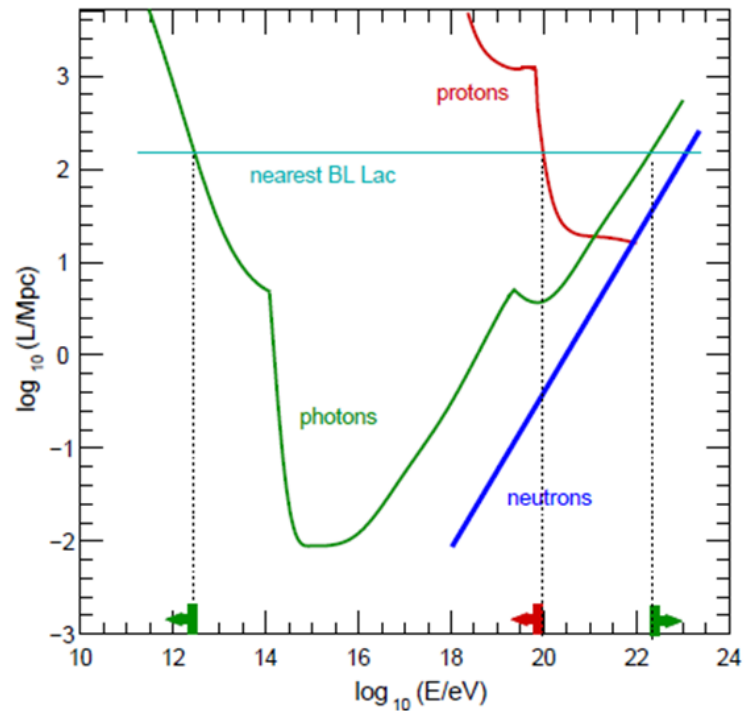


図 6.9: 電磁波および宇宙線に対する宇宙の透明度.[Fairbairn, Rashba, Troitsky: PRD84, 25019 (2011)]

様々な背景放射の非等方性

- X線: 10^{-4} 程度の非等方性
- CMB: 10^{-5} 程度の非等方性
- 双極成分: ただし, すべての背景放射は 10^{-3} 程度の大きな双極非等方性をもつ. これは通常, 我々が背景放射に対して運動しているためと解釈されるが, この運動が局所的なものでなく, 800Mpc を超えるスケールの大域的なものであることを示唆する観測がある [review: Kashlinski A, Atrio-Barandela F, Ebeling H: arXiv:1202.0717]
- GRB

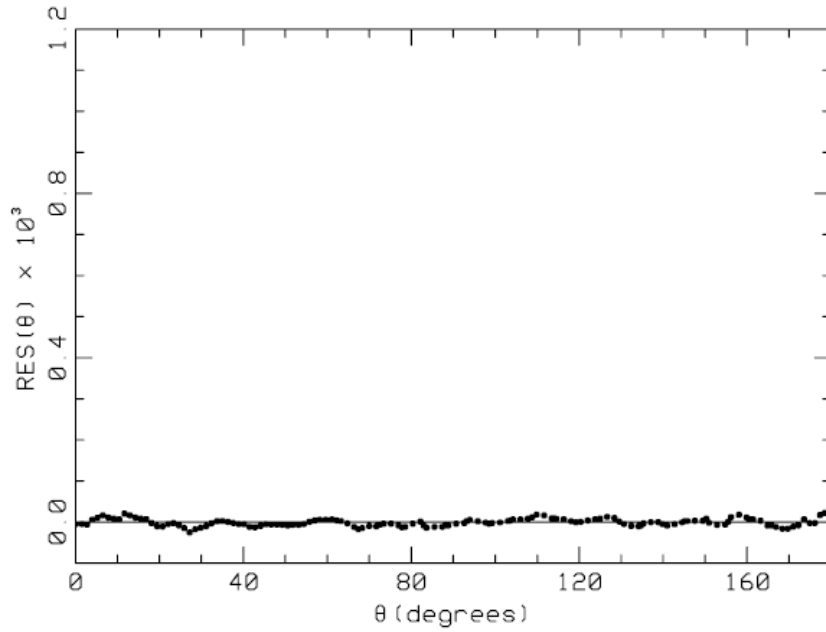


FIG. 4.—Residuals of the ACF fit from Fig. 3, after the shot noise, PSF, and a simple model of the intrinsic fluctuations have been removed.

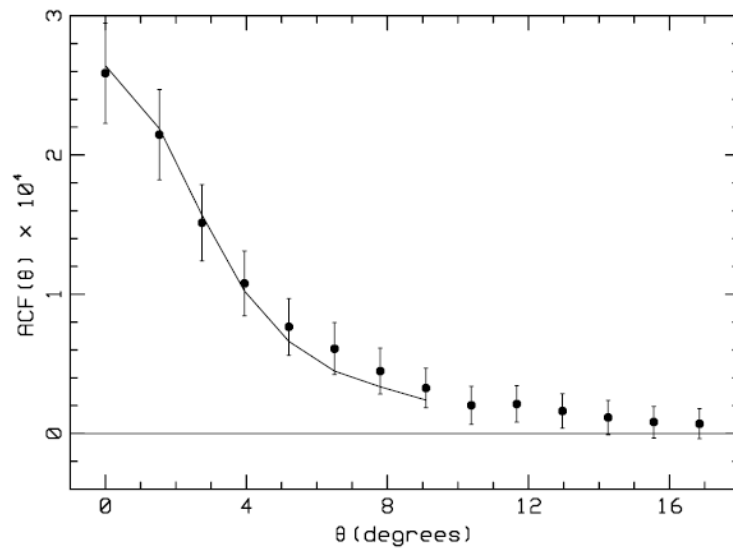


FIG. 5.—Intrinsic ACF, with shot noise and PSF fits removed. For comparison, a simple θ^{-1} model for the intrinsic correlations is shown. The data beyond 9° is not used because of uncertainty due to the fitting of the large-scale structures. The model has been smoothed by the PSF and corrected for the removal of the large-scale structures, which suppresses the correlations on scales larger than 10° .

図 6.10: HEAO 衛星観測に基づく CXB の異方性 [Boughn SP, Crittenden RG, Koehrsen GP: ApJ580, 672 (2002)]

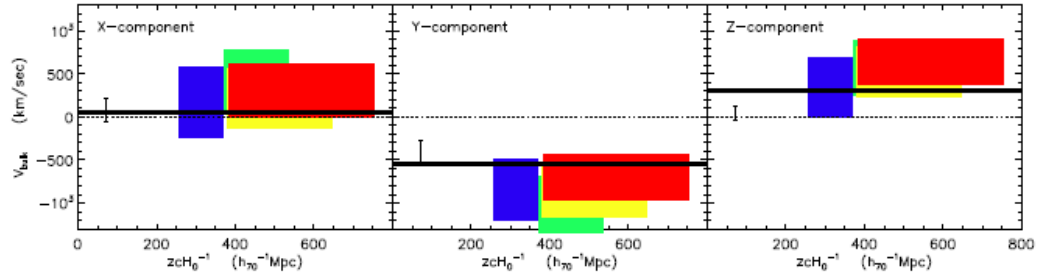


Fig. 10.19.— Three bulk velocity components from KAEEK vs CMB dipole. Error bar shows the $2\text{-}\sigma$ range from Feldman et al (2010), thick horizontal line shows the CMB dipole velocity after correcting for local motions from Table 3 of Kogut et al (1993). Colors are from KAEEK as per Table 10.3. Note that the Feldman et al (2010) and Watkins et al (2009) derived flow does not account fully for the overall CMB dipole.

図 6.11: 銀河団の kSZ 効果から求めた大域的運動の双極成分 (dark flow) と CMB dipole の相関 [Kashlinski A, Atrio-Barandela F, Ebeling H: arXiv:1202.0717]

§6.2

基礎方程式

時空次元 $D = 1 + n$

等長変換群 $G = \text{ISO}(n), \text{SO}(n + 1), \text{SO}(n, 1)$: 空間は定曲率

$$\begin{aligned}
 d\sigma_K^2 &= d\chi^2 + f_K(\chi)^2 d\Omega_{n-1}^2; \quad f_K(\chi) = \begin{cases} \chi & K = 0 \\ K^{-1/2} \sin(K^{1/2}\chi) & K > 0 \\ |K|^{-1/2} \sinh(|K|^{1/2}\chi) & K < 0 \end{cases} \\
 &= \frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 d\Omega_{n-1}^2. \tag{6.2.1}
 \end{aligned}$$

時空計量

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2 d\sigma_K^2 \tag{6.2.2}$$

宇宙膨張

$$d(t) = a(t)\chi \Rightarrow v(t) = \dot{d} = \dot{a}\chi = H(t)d(t); \quad H(t) = \dot{a}/a \tag{6.2.3}$$

エネルギー運動量テンソル

$$T_{tt} = \rho(t), \quad T_{tj} = 0, \quad T_j^i = P(t)\delta_j^i \tag{6.2.4}$$

Einstein 方程式 $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa^2 T_{\mu\nu}$

$$G_{tt} : \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} - \frac{2\Lambda}{n(n-1)} = \frac{2\kappa^2}{n(n-1)}\rho \quad (6.2.5a)$$

$$G_j^i : \frac{\ddot{a}}{a} + \frac{n-2}{2} \left\{ \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} \right\} - \frac{\Lambda}{n-1} = -\frac{\kappa^2 P}{n-1} \quad (6.2.5b)$$

エネルギー保存則 $\nabla^\nu T_{\mu\nu} = 0$

$$\dot{\rho} = -n(\rho + P)\frac{\dot{a}}{a} \quad (6.2.6)$$

§6.3

単純な宇宙モデル

$w = P/\rho$ が一定とすると，基礎方程式は

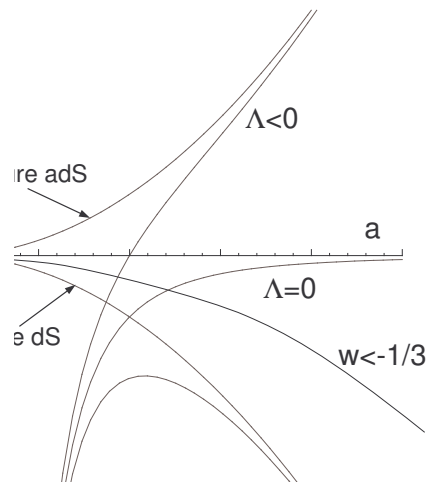
$$\rho \propto a^{-n(1+w)} \Rightarrow \dot{a}^2 + V(a) = -K \tag{6.3.1}$$

に帰着される．ここで，

$$V = -\frac{C}{a^{n(1+w)-2}} - \lambda a^2,$$

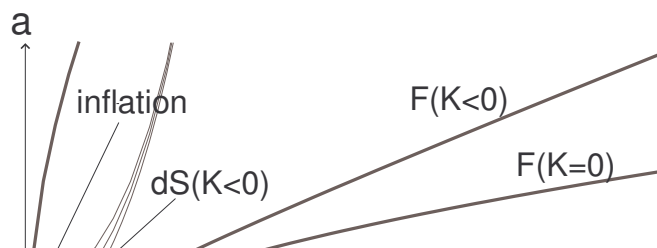
$$C = \frac{2k^2 \rho_0}{n(n-1)} = \Omega_M H_0^2,$$

$$\lambda = \frac{2\Lambda}{n(n-1)} = \Omega_\Lambda H_0^2.$$



特徴

- $\Lambda < 0$ の時，常に宇宙は有限時間で収縮を始める．
- $\Lambda = 0$ の時は， $K = 0$ ないし $K < 0$ なら，宇宙は膨張を続ける．
- $\Lambda > 0$ の時， K がある正の臨界値より大きいと，再収縮するとサイズが有限な最小値を持つ解の2つが存在．



§6.4

宇宙パラメーター

基礎方程式 (Friedmann 方程式)

- 膨張方程式

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{\kappa^2}{3}\rho - \frac{K}{a^2} = \frac{\kappa^2}{3}\rho_M - \frac{K}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (6.4.1)$$

- エネルギー方程式

$$\frac{\dot{\rho}}{\rho} = -3(1+w)\frac{\dot{a}}{a} \quad (6.4.2)$$

- 状態方程式

$$w = \frac{P}{\rho} \quad (6.4.3)$$

宇宙パラメーター

- Hubble 定数 : H_0 ($a(t_0) = 1$)

- 密度パラメータ :

$$H_0^2 = \frac{\kappa^2}{3}\rho_{\text{cr}} \Rightarrow \Omega_E = \frac{\rho}{\rho_{\text{cr}}}, \quad \Omega_M = \frac{\rho_M}{\rho_{\text{cr}}}, \quad \Omega_K = -\frac{K}{H_0^2}, \quad \Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H_0^2} \quad (6.4.4)$$

これらは, 関係式

$$1 = \Omega_E + \Omega_K, \quad \Omega_E = \Omega_M + \Omega_\Lambda \quad (6.4.5)$$

を満たす.

- 物質組成 :

$$\begin{aligned} \Omega_M &= \Omega_{\text{DM}} + \Omega_{\text{b}} + \Omega_{\nu} + \Omega_{\gamma} + \Omega_{\text{GW}} + \Omega_{\text{DE}} + \dots \\ &\Rightarrow w = w(a). \end{aligned} \quad (6.4.6)$$

§6.5

Friedmann モデル

基本仮定

$$D = 4, \quad \Lambda = 0, \quad \Omega_M = \Omega_n + \Omega_r. \quad (6.5.1)$$

曲率による違い

- $\Omega_M = 1$ (Einstein-de Sitter モデル: $K = 0$)

$$a = \Omega_n \xi^2 + 2\Omega_r^{1/2} \xi, \quad (6.5.2a)$$

$$H_0 t = \frac{2}{3} \Omega_n \xi^3 + 2\Omega_r^{1/2} \xi^2 \quad (6.5.2b)$$

$$H_0 t_0 = \frac{2}{3} \frac{1 + 2\Omega_r^{1/2}}{(1 + \Omega_r^{1/2})^2} \quad (6.5.2c)$$

- $\Omega_M < 1$ (Open モデル; $K < 0$)

$$a = \frac{\Omega_n}{2(1 - \Omega_M)} (\cosh \theta - 1) + \frac{\Omega_r^{1/2}}{\sqrt{1 - \Omega_M}} \sinh \theta, \quad (6.5.3a)$$

$$H_0 t = \frac{\Omega_n}{2(1 - \Omega_M)^{3/2}} (\sinh \theta - \theta) + \frac{\Omega_r^{1/2}}{1 - \Omega_M} (\cosh \theta - 1) \quad (6.5.3b)$$

$$H_0 t_0 = \frac{\Omega_n}{1 - \Omega_M} \left(\frac{1 + \Omega_r^{1/2}}{\Omega_M + 2\Omega_r^{1/2} + \Omega_r} - \frac{1}{\sqrt{1 - \Omega_M}} \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \Omega_M} + \Omega_r^{1/2}}{(\Omega_0 + 2\Omega_r^{1/2} + \Omega_r)^{1/2}} \right) + \frac{2\Omega_r^{1/2}}{\Omega_M + 2\Omega_r^{1/2} + \Omega_r} \quad (6.5.3c)$$

- $\Omega_M = 0$ (Milne 宇宙: $K < 0$)

$$ds^2 = -dt^2 + t^2 d\sigma_{-1}^2 \quad (6.5.4)$$

§6.6

宇宙年齢

一般に，物質優勢宇宙では

$$\begin{aligned}
 t_0 &= \int_0^1 \frac{da}{aH} = \frac{1}{H_0} \int_0^1 \frac{da}{(\Omega_M a^{-1} + \Omega_K + \Omega_\Lambda a^2)^{1/2}} \\
 &= \frac{2}{3H_0} \int_0^1 \frac{da^{3/2}}{[1 - \Omega_K(1-a) - \Omega_\Lambda(1-a^3)]^{1/2}}.
 \end{aligned} \tag{6.6.1}$$

平坦モデル

物質優勢 ($4D, \Lambda = 0$): $\gamma = 2/3$

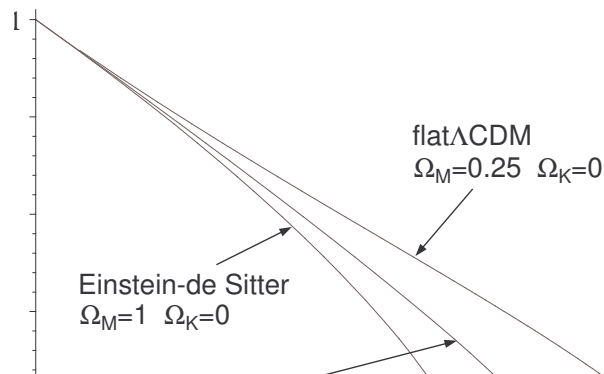
$$t_0 = 2/(3H_0) = 9.3\text{Gyrs}(0.7/h) \tag{6.6.2}$$

輻射優勢 ($4D, \Lambda = 0$): $\gamma = 1/2$

$$t_0 = 1/(2H_0) = 7\text{Gyrs}(0.7/h) \tag{6.6.3}$$

Flat Λ CDM ($4D, \Omega_M = 0.25$):

$$t_0 \simeq 1.01/H_0 = 14\text{Gyrs}(0.7/h) \tag{6.6.4}$$



 §6.7

 特異点

宇宙膨張の加速度

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{(n-2)\kappa^2}{n(n-1)} \left(\rho + \frac{n}{n-2}P \right) + \frac{2\Lambda}{n(n-1)} \quad (6.7.1)$$

(宇宙項 Λ は $\rho = -P = \Lambda/\kappa^2$ と対応.)

宇宙の初期特異点 強エネルギー条件

$$P \geq -\frac{n-2}{n}\rho \Leftrightarrow w \geq -1 + \frac{2}{n} \quad (6.7.2)$$

が満たされれば、必ず有限な過去に $a = 0$ となる。すなわち、宇宙は有限な年齢をもつ。

Big-Rip 特異点 $w < -1$ のとき、 $\alpha = -n(1+w)/2 (> 0)$ とおくと、

$$\rho \propto a^{2\alpha} \Rightarrow t = \int^a \frac{da}{aH} \propto \text{const} - \frac{1}{a^\alpha} \quad (6.7.3)$$

より、有限な時間でスケール因子も密度も発散

$$a \propto \frac{1}{(t_* - t)^{1/\alpha}}, \quad \rho \propto \frac{1}{(t_* - t)^2} \quad (6.7.4)$$



§6.8

光の伝搬

光波面の方程式 RW 計量が

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2(d\chi^2 + r_K^2 d\Omega_{n-1}^2) \quad (6.8.1)$$

と表される座標系において,

$$d\eta := \frac{dt}{a(t)} = \pm d\chi \Rightarrow \chi = \chi_0 \pm (\eta - \eta_0) \quad (6.8.2)$$

宇宙論的赤方偏移 動径距離 χ の位置から時刻 t および $t + \Delta t$ に出た光が原点 $\chi = 0$ に到達する時刻をそれぞれ $t_0, t_0 + \Delta t_0$ とすると

$$\Delta\eta = \Delta\eta_0 \Leftrightarrow \frac{\Delta t}{a(t)} = \frac{\Delta t_0}{a(t_0)} \Leftrightarrow \lambda_0 = \frac{a(t_0)}{a(t)}\lambda \Leftrightarrow \nu_0 = \frac{a(t)}{a(t_0)}\nu \quad (6.8.3)$$

これより, 時刻 t に共動的天体から出た光の赤方偏移は

$$z \equiv \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda} = \frac{a(t_0)}{a(t)} - 1 \Leftrightarrow a(t) = \frac{a(t_0)}{1+z} \quad (6.8.4)$$

§6.9

ホライズン

粒子ホライズン 時刻 t の観測者を頂点とする過去の光円錐は

$$\chi = \eta_0 - \eta = \int_t^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = \int_a^{a_0} \frac{da}{a^2 H} \quad (6.9.1)$$

時刻 t までに観測できる球領域の共動半径 $L_H(t)$ は

$$L_H(t) = \int_0^{a(t)} \frac{da}{a^2 H} \quad (6.9.2)$$

L_H は次の条件が満たされると有限となる.

$$\lim_{a \rightarrow 0} a^2 \rho = \infty \quad (6.9.3)$$



$L_H(t)$ は、初期面上の1点から出た光波面の時刻 t での共動半径と一致する.

Hubble ホライズン

- ゆらぎの力学的振る舞いなどでは、Hubble ホライズン半径 $1/H$ が上記の $L_H(t)$ より重要となる.
- Friedmann モデルでは、Hubble ホライズン半径は $L_H(t)$ と同程度となり、時間 t に比例して増大する.

§6.10

距離測定

6.10.1 方法

光度距離

固有光度 L , 見かけの明るさ $F_{\text{obs}} \Rightarrow L = 4\pi d_L^2 F_{\text{obs}} \Rightarrow$ 光度距離 d_L

角径距離

固有径 D , 見込み角 $\theta \Rightarrow D = \theta d_D \Rightarrow$ 角径距離 d_D

一般に固有量 + 見かけの量 \Rightarrow 天体までの (様々な) 距離

6.10.2 距離梯子

方法	適用距離
年周視差測定	0~100pc
星団視差法	100pc~10kpc
散開星団主系列星	100pc~50kpc
Cepheid 型変光星	10kpc~25Mpc
Tully-Fisher 法	10Mpc~200Mpc
SN Ia	60Mpc~4000Mpc

高精度方位観測衛星

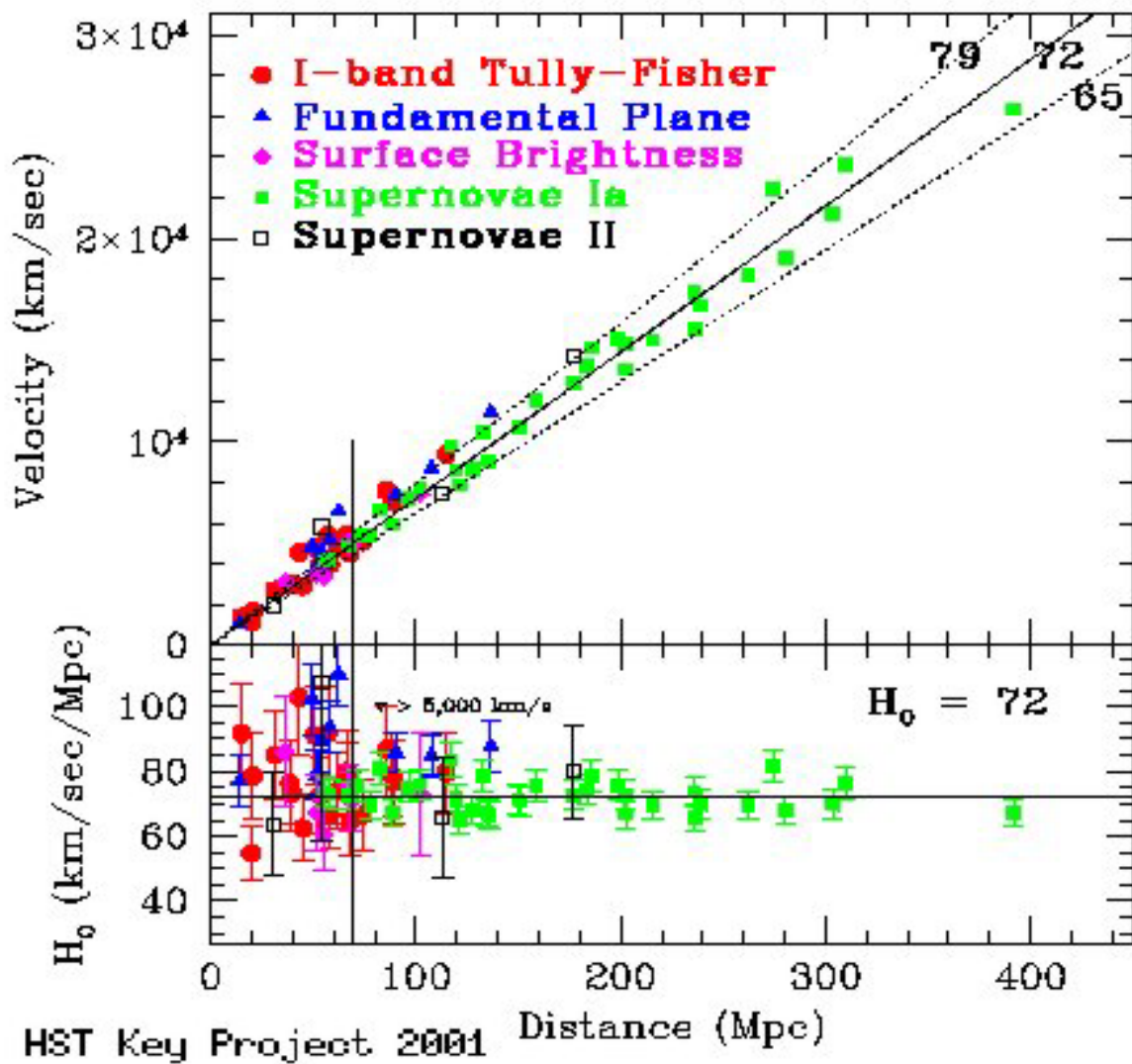
- Hipparcos (1989-1993): 1 m arcsec
- GAIA (2013?-): all star scan for $m \leq 20\text{mag}$. 角度分解能: $24 \mu \text{ arcset}$ ($m \leq 15\text{mag}$), 20% accuracy for distances at 8kpc (Galactic center) [http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Gaia_overview]
- JASMINE: Nano-Jasmine (3 mas at $z \approx 7.5$, 2014 年-), Small-Jasmin ($10 \mu \text{as}$ at $H \approx 11.5$, 2016-), Jasmin ($10 \mu \text{as}$ at $K \approx 11$, 2020 年代). [<http://www.jasmine-galaxy.org/index-ja.html>]

§6.11

Hubble 定数

観測値

$$H_0 = 71 \pm 10 \text{ km/s/Mpc} \quad (6.11.1)$$



§6.12

Extended Hubble digram

6.12.1 赤方偏移-光度距離関係

- 赤方偏移 z と宇宙サイズ a の関係

$$a = \frac{1}{1+z} \tag{6.12.1}$$

- 距離と面積の関係

$$S = \pi\theta^2 f(r)^2; \quad f(r) = \begin{cases} r & K = 0 \\ R \sin(r/R) & K = 1/R^2 \\ R \sinh(r/R) & K = -1/R^2 \end{cases} \tag{6.12.2}$$

- $d_L - z$ 関係

$$F = \frac{L}{4\pi f(r)^2 (1+z)^2} \Rightarrow d_L = (1+z)f(r), \tag{6.12.3}$$

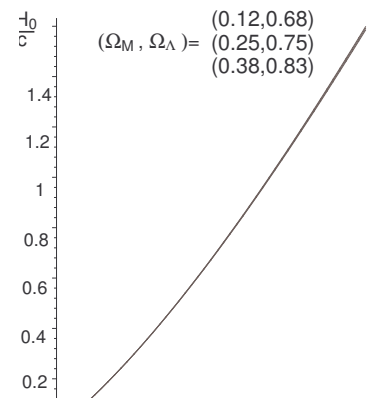
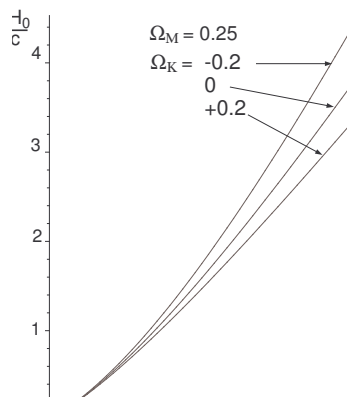
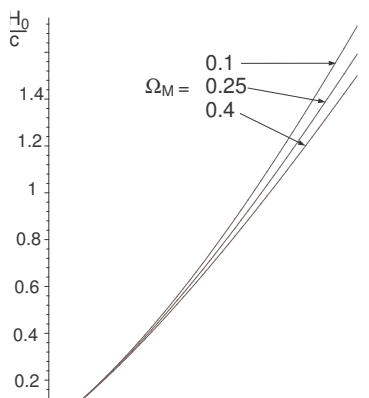
$$adr = -cdt = \frac{cadz}{H} \Rightarrow r = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz}{\sqrt{\Omega_m(z) + (1+z)^2 \Omega_K + \Omega_\Lambda}} \tag{6.12.4}$$

6.12.2 パラメーター依存性

Flat Λ CDM モデル

曲がった CDM モデル

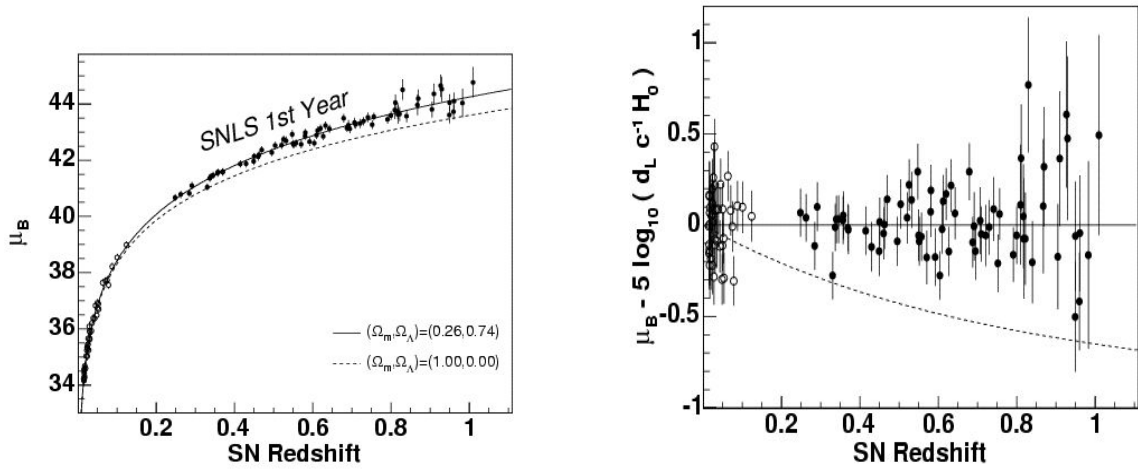
縮退



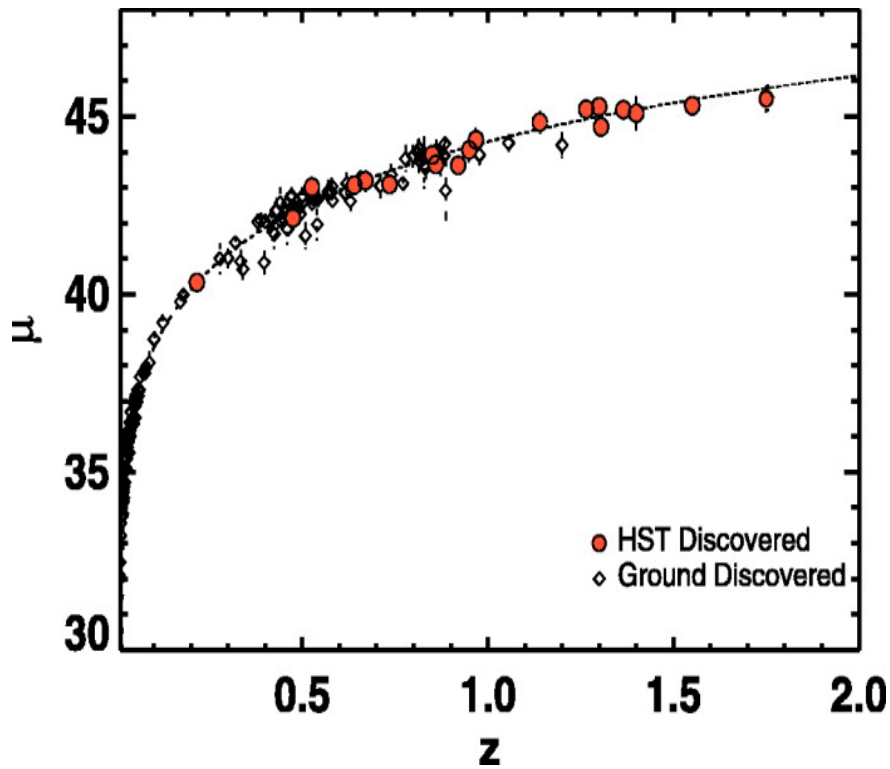
§6.13

SN Ia 観測

SNLS collaboration [A&A 447:31 (2006)]



HST observation[Riess et al]



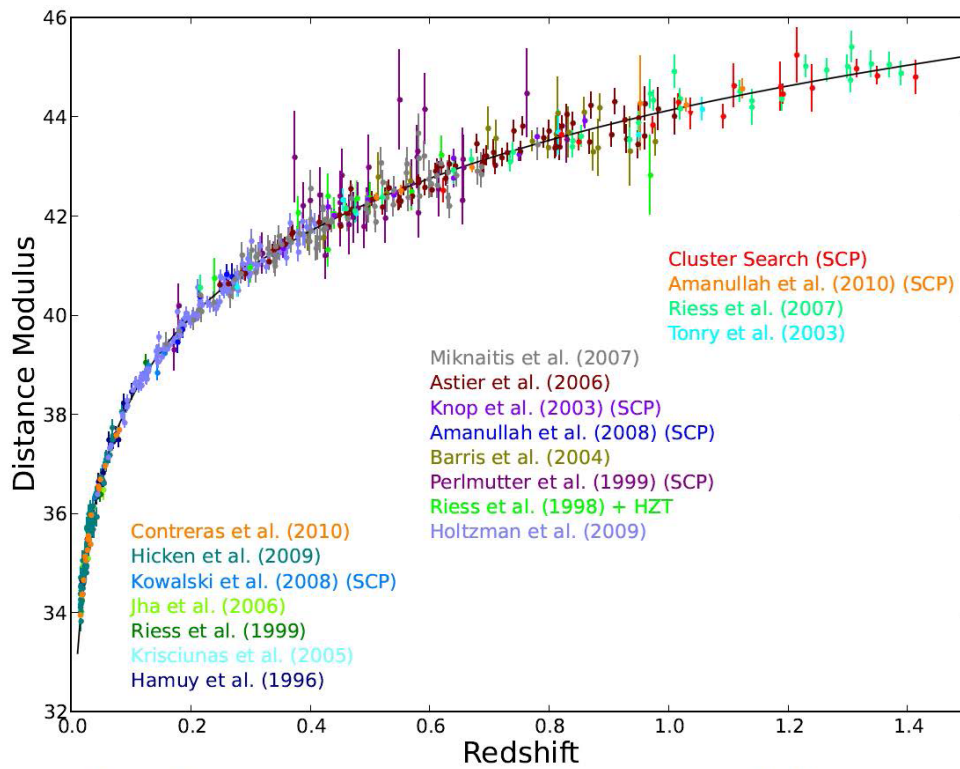


Figure 4. Hubble diagram for the Union2.1 compilation. The solid line represents the best-fit cosmology for a flat Λ CDM Universe for supernovae alone. SN SCP06U4 falls outside the allowed x_1 range and is excluded from the current analysis. When fit with a newer version of SALT2, this supernova passes the cut and would be included, so we plot it on the Hubble diagram, but with a red triangle symbol.

図 6.12: HST Cluster SN Survey により得られた $d_L - z$ プロット [Suzuki N et al: arXiv:1105.3470]

§6.14

宇宙の物質組成

エネルギー密度

- 相対論的物質

- 電磁波

$$T_{\text{CMB}} = 2.725 \pm 0.002\text{K} \Rightarrow h^2\Omega_{\text{CMB}} = 2.38 \times 10^{-5} (T/2.73\text{K})^4$$

- 重力波

- Dark radiation

- 非相対論的物質

- 原子物質: $\Omega_b \simeq 0.04$ (BBN: $0.017 < h^2\Omega_b < 0.024$, WMAP 9yr: $\Omega_b \simeq 0.046$)

- ニュートリノ ($m_\nu > 2 \times 10^{-4}\text{eV}$)

$$\rho_{\nu+\bar{\nu},0} = \sum_i m_{\nu_i} c^2 n_{i,0} \simeq 112 \sum_i m_{\nu_i} c^2 \text{cm}^{-3} \Rightarrow h^2\Omega_\nu = \left(\sum_i m_{\nu_i} \right) / 94\text{eV} \lesssim 10^{-3}$$

- 冷たいダークマター: $\Omega_{\text{DM}} \simeq 0.24$ [WMAP 9yr]

- その他

- 宇宙項/ダークエネルギー: $\Omega_\Lambda \simeq 0.72$ [WMAP 9yr]

- Hidden sector objects/fields

エントロピー CMBが宇宙のエントロピーの主要部を担っている:

$$s_{\text{CMB}} = \frac{4\pi^2}{45} \left(\frac{k_B T}{\hbar c} \right)^3 = 1490 \left(\frac{T_{\text{CMB}}}{2.73\text{K}} \right)^3 \text{cm}^{-3} \quad (6.14.1)$$

これを宇宙に存在する陽子の平均個数密度

$$n_b = 2.46 \cdot 10^{-7} \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.022} \right) \text{cm}^{-3} \quad (6.14.2)$$

で割ると, 陽子一個あたりのCMBエントロピーは

$$s_{\text{CMB}}/n_b \simeq 6 \cdot 10^9 \quad (6.14.3)$$

C f. 太陽などの恒星がもつ陽子一個あたりのエントロピーは

$$(s/n)_{star} \sim 30 \quad (6.14.4)$$

程度で, CMB のエントロピーの $1/10^8$ 以下しかない.

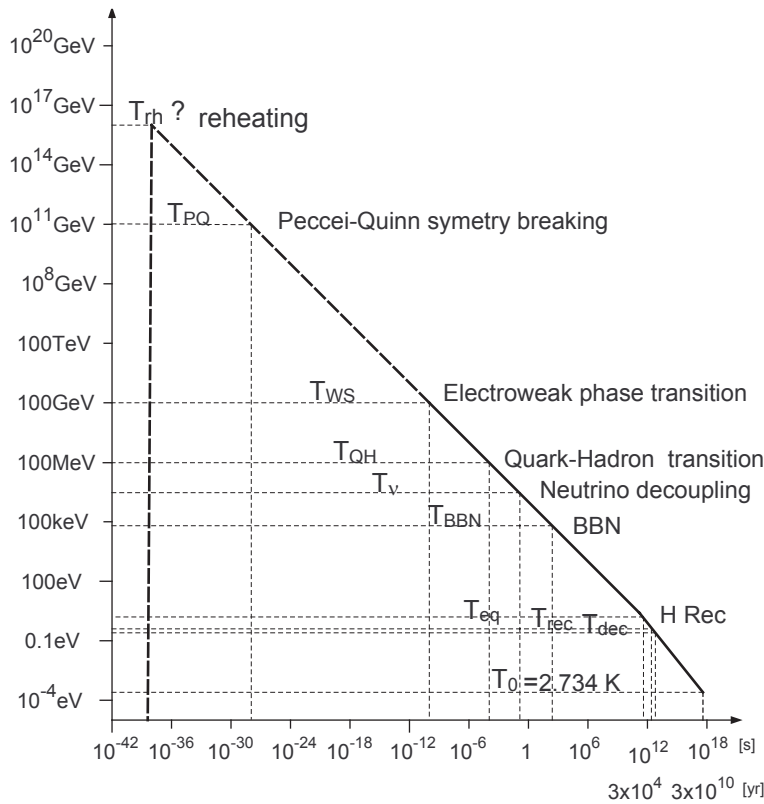


図 6.13: 宇宙の熱史

§6.15

宇宙の熱史

宇宙の温度 激しい非可逆過程が宇宙全体で起こらない限り，CMB に対応する光子ガスのもつエントロピーは保存され，光子ガスの温度が宇宙初期ほど高温になる：

$$a^3 s_{\text{CMB}} \simeq \text{const} \Rightarrow T \propto 1/a \tag{6.15.1}$$

宇宙は最初，急速に膨張する熱い火の玉状態で始まり，宇宙膨張と共に温度が下がり，膨張速度が減速し現在の姿になったと考えられる．これが熱いビッグバン宇宙モデルである．

物質組成の変化 熱いビッグバンモデルでは，時間をさかのぼると，温度の上昇と共に物質がより基本的な構成要素に分解されてゆく．このため，宇宙のごく初期では，物質は最も基本的な素粒子からなる高温のプラズマ状態にある．このプ

原因	温度	時間	H	直後の主要粒子	$g(T)$
現在	2.725K	13.8Gyr	1.5×10^{-33} eV	$\gamma; 3\nu$	2(+21/11)
水素中性化	3800K	0.25Myr	4.9×10^{-29} eV	$\gamma; 3\nu$	2(+21/11)
e^+ 消滅	30keV	1450s	2.2×10^{-19} eV	$\gamma; 3\nu$	2(+21/11)
e^+e^- 対消滅	0.5MeV	3.46s	8.7×10^{-17} eV	$\gamma, e^+, e^-; 3\nu$	2(+21/11)
ν_e の乖離	1.2MeV	0.56s	5.6×10^{-16} eV	$4\gamma, e^+, e^-; 3\nu$	5.5(+5.25)
ν_μ, ν_τ の乖離	3MeV	0.085s	3.8×10^{-15} eV	$\gamma, e, \nu_e; 2\nu$	7.25(+3.5)
μ の対消滅	100MeV	43 μ s	6.5×10^{-12} eV	$\gamma, e, 3\nu$	10.75
QH 転移	200MeV	10 μ s	3.0×10^{-11} eV	$\gamma, e, \mu, 3\nu$	14.25
c の対消滅	1.2GeV	1.7×10^{-7} s	1.7×10^{-9} eV	$\gamma, 8G, e, \mu, 3\nu, u, d, s$	61.75
τ の対消滅	1.8GeV	9.1×10^{-8} s	3.5×10^{-9} eV	$\gamma, 8G, e, \mu, 3\nu, u, d, s, c$	72.25
b の対消滅	4.2GeV	1.6×10^{-8} s	2.1×10^{-8} eV	$\gamma, 8G, e, \mu, t, 3\nu, u, d, s, c$	75.75
WS 転移	100GeV	2.5×10^{-10} s	1.3×10^{-5} eV	$\gamma, 8G, 3l, 3n, u, d, s, b, c$	86.25
標準モデル				$B, 3A, 8G, 4h, 3l, 3\nu, 6q$	106.75
高温極限					
MSSM				$B, 3A, 8G, 8h, 3l, 3\nu, 6q$	
高温極限				$\tilde{B}, 3\tilde{A}, 8\tilde{G}, 8\tilde{h}, 3\tilde{l}, 3\tilde{\nu}, 6\tilde{q}$	228.75

表 6.2: 宇宙物質構成の変化と統計的重み

ラズマでは、光子を経由した粒子と反粒子の対生成・対消滅が盛んにおきる。

$$e^+ + e^- \leftrightarrow 2\gamma \leftrightarrow u + \bar{u}, \dots$$

§6.16

CMBと宇宙音波

6.16.1 Jeans 長

孤立したガス雲 半径 L , 質量密度 μ のガス雲を考える. 流体の運動方程式

$$\mu \frac{dv}{dt} = -\nabla P - \mu \nabla \phi \quad (6.16.1)$$

より, ガス雲が力学的に平衡状態にあるためには, ガス雲の単位体積に働く重力 $\sim G\mu M/L^2 \approx G\mu^2 L$ と圧力勾配による力 $\sim P/L \approx c_s^2 \mu/L$ が釣り合う必要がある:

$$G\mu^2 L \approx \frac{c_s^2 \mu}{L} \quad (6.16.2)$$

これより得られる特徴的な長さ

$$L_J = \frac{c_s}{(G\mu)^{1/2}} \quad (6.16.3)$$

をこのガス雲の (Jeans 長) という.

一様なガス雲の密度ゆらぎ 一様なガス雲の密度ゆらぎ $\delta\mu$ に対して, 平衡条件は

$$G\delta\mu\mu/L^2 \approx c_s^2 \delta\mu/L \Rightarrow L \approx L_J \quad (6.16.4)$$

この場合, c_s の変化が小さいとすると,

- $L < L_J \Rightarrow$ ゆらぎは音波として伝播. (周りのガスの反作用)
- $L > L_J \Rightarrow$ 重力収縮により限りなく増大 (Jeans 不安定).

6.16.2 宇宙音波

宇宙の Jeans 長 水素再結合時 t_{rec} 以前の時期では, 放射とプラズマは一体となって運動し, 圧力とエネルギー密度は

$$\rho = \rho_r + n_b m_p^2, \quad P = \frac{1}{3} \rho_r + n_b T. \quad (6.16.5)$$

よって, 音速は

$$c_s^2 = \frac{\dot{p}}{\dot{\rho}} = 4 \frac{P}{4\rho_r + 3\rho_b} = \frac{1}{3} \frac{1 + 4n/s_\gamma}{1 + a/a_*} \quad (6.16.6)$$

ここで, a_* は $\rho_r = \rho_b$ となる時のスケール因子の値.

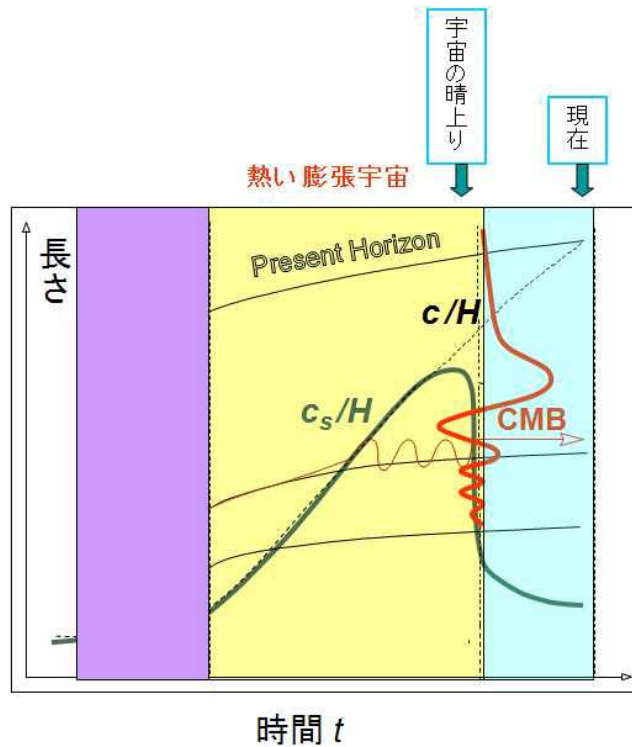


図 6.14: CMB の音波

- $\rho_r \gg \rho_b$ の時期: 音速はほぼ $c_s \approx c/\sqrt{3}$ となり, Jeans 長は共動座標で表して

$$\chi_J = a^{-1}L_J \approx \frac{c_s}{aH} \approx \frac{1}{\sqrt{3}Ha} \propto \frac{t}{a} \quad (6.16.7)$$

となる. すなわち, χ_J は (共動座標で表した) Hubble ホライズン半径 $c/(aH)$ に比例して時間と共に増大.

- $\rho_r < \rho_b$ & $T > T_{\text{rec}}$ の時期:

$$c_s^2 \approx \frac{a_*}{3a} \quad (6.16.8)$$

より,

$$\chi_J \approx \frac{1}{\sqrt{3}Ha_*} \left(\frac{a_*}{a}\right)^{3/2} \approx \frac{1}{\sqrt{3}H_*a_*} \approx 0.033 \frac{c}{H_0} \approx 140\text{Mpc} \quad (6.16.9)$$

- $T < T_{\text{rec}}$ の時期: 水素は中性化し, 水素ガスの Jeans 長はガス圧 $P_g = n_b k_B T$ のみで決まるようになる.

$$P_g/P_r \approx n_b/s \approx 10^{-9} \quad (6.16.10)$$

なので, 水素中性化により物質の Jeans 長は一挙に $4/10^5$ 倍程度に縮んでしまう.

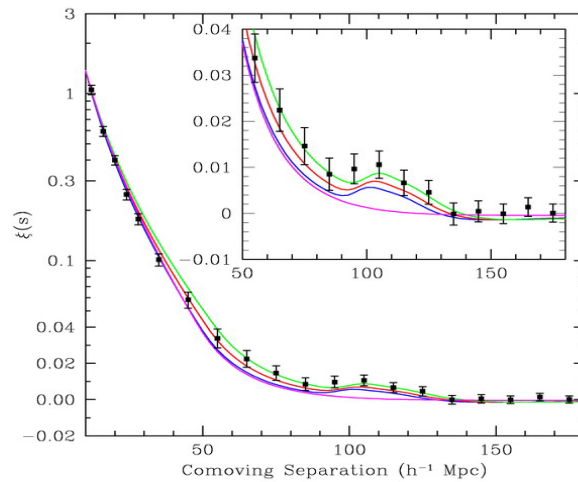


図 6.15: SDSS により発見されたバリオン音響振動 [出典：SDSS 観測データ [?]]

以上の変化のため，宇宙における共動座標で測った Jeans 長は水素中性化の頃に最大値 $\chi_{Jm} \sim 1/(aH)_{\text{dec}}$ をもつ．このため，共動座標での波長を λ とするとき，

- $\lambda > \chi_{Jm}$ となる長波長のゆらぎ: Jeans 不安定により成長を続ける．
- $\lambda < \chi_{Jm}$ となる短波長ゆらぎ: $\chi_J \sim c/(aH)$ が λ を超えると音波として振動を初め，水素の中性化の後では，水素ガス密度のゆらぎおよび CMB の温度ゆらぎとして現在まで残ることになる (図 6.14) ．

BAO これらのうち，短波長の水素ガス密度のゆらぎはその後，水素ガスから銀河ができる際に銀河の分布のゆらぎを生み出す．銀河分布の主要部分はこの音響振動と結合しないダークマターの分布により決まる．このため，この水素 (バリオン) 音響振動 (**Baryon Acoustic Oscillation**) の影響は非常にわずかなものとなる．

このわずかな BAO が，SDSS サーベイにより得られた宇宙地図の銀河相関の解析により発見された (図 6.15[?])．この図は，赤方偏移がある範囲にある銀河の角度 2 体相関 $\xi(s)$ ，すなわち勝手な銀河を基準として天球上で角半径 s の円を考えたとき，その円に含まれる銀河の個数の平均よりのずれの統計平均を s の関数としてプロットしたものである．図を見ると，確かに現在の距離 (共動距離) にして $100h^{-1}\text{Mpc}$ あたりにふくらみがあるのが見て取れる．

これが BAO に対応することを確認するため，宇宙晴れ上がり前での宇宙音波の振る舞いをもう少し詳しく見てみよう．まず，ダークマターの存在も考慮すると，ダークマターのエネルギーが宇宙膨張を支配する時期での電磁輻射と物質の混合気体を伝播する波数 k/a の音波の方程式は，

$$\frac{d^2 X}{da^2} + \frac{k^2 c_r^2}{a^4 H^2} X \approx 0; \quad X = \left(\frac{H}{1 + w_r} \right)^{1/2} a^3 \rho_r \Delta_r \quad (6.16.11)$$

となる．ここで， Δ_r は密度ゆらぎのコントラスト $\delta\rho_r/\rho_r$ を表す量である．この WKB 解

$$\Delta_r = \frac{A}{a^2} \left(\frac{1+w_r}{c_r\rho_r} \right)^{1/2} \sin \left(\int_0^a \frac{kc_r}{a^2 H} da \right) \quad (6.16.12)$$

の $t = t_{\text{dec}}$ での値は，次のように書き換えられる：

$$|\Delta_r|^2 \propto \frac{A^2(k)}{(1+10^3 a)^2} \sin^2 \left(\gamma \frac{k}{(aH)_{\text{dec}}} \right) \quad (6.16.13)$$

ここで，

$$\gamma = \int_0^1 \left(\frac{2}{(1+x)(4+3x)} \right)^{1/2} dx \simeq 0.5 \quad (6.16.14)$$

これより，宇宙晴れ上がり時での音波の振幅 $|\Delta_r(t_{\text{dec}})|^2$ は，離散的な波数

$$\frac{k_n}{(aH)_{\text{dec}}} = \frac{\pi}{2\gamma}(2n-1) \simeq (2n-1)\pi \quad (6.16.15)$$

でピークをもつことが分かる．

$(aH)_{\text{dec}}$ を評価しよう．まず，CMB の最終散乱面 $t = t_{\text{dec}}$ で我々が観測できる領域の半径に相当する $t = t_{\text{dec}}$ 時での固有長 $r_{\text{plc}}(t_{\text{dec}})$ と対応する現在の長さ（共動長） $\chi_{\text{plc}}(t_{\text{dec}})$ は，

$$\chi_{\text{plc}} = \int_t^{t_0} \frac{dt}{a} = 3t_0 (1 - a^{1/2}) \quad (6.16.16)$$

より

$$\chi_{\text{plc}}(t_{\text{dec}}) \simeq 3t_0 = l_H(t_0), \quad (6.16.17a)$$

$$r_{\text{plc}}(t_{\text{dec}}) = 3t_0 a(t_{\text{dec}}) \quad (6.16.17b)$$

よって， $r_{\text{plc}}(t_{\text{dec}})$ と $l_H(t_{\text{dec}})$ の比は

$$\frac{r_{\text{plc}}(t_{\text{dec}})}{l_H(t_{\text{dec}})} \simeq \frac{t_0 a_{\text{dec}}}{t_{\text{dec}}} = z_{\text{dec}}^{1/2} \simeq 33. \quad (6.16.18)$$

この比は $(aH)_{\text{dec}}/(aH)_0$ と等しいので，

$$\frac{c}{(aH)_{\text{dec}}} \simeq \frac{c}{33H_0} \simeq 100h^{-1}\text{Mpc} \quad (6.16.19)$$

を得る．(6.16.13) 式は， $|\Delta_r|^2$ が波数 k の空間で周期 $(aH/c)_{\text{dec}}$ を持っていることを表しており，この周期変動は $|\Delta_r|^2$ の Fourier 変換に当たる相関関数 $\xi(s)$ に $s \simeq c/(aH)_{\text{dec}}$ のあたりに 1 個のピークを生み出すことが示される [?]. これより，図 6.15 に示されている相関関数の盛り上がりがまさに BAO に対応することが分かる．

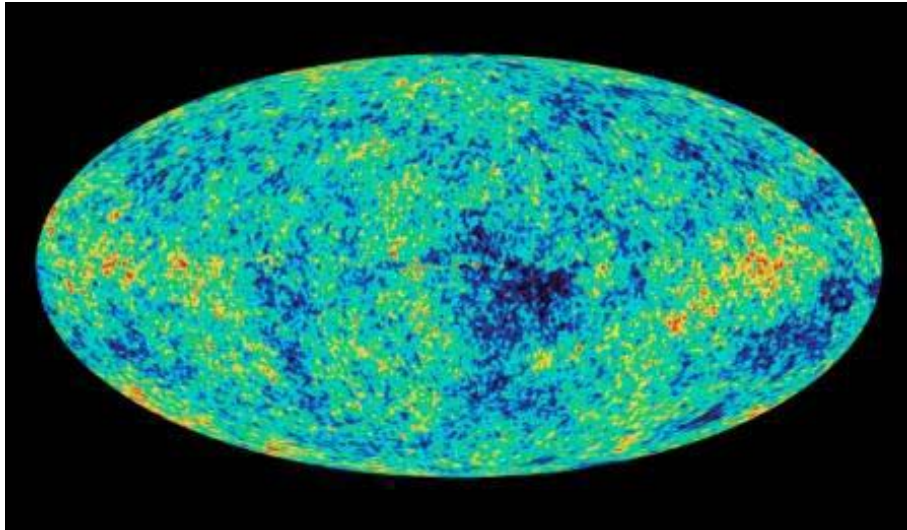


図 6.16: WMAP によって得られた CMB 温度地図 [出典: WMAP5yr データ [?]]

§6.17

CMB による観測

光子最終散乱面での音響振動は、CMB の観測でも見ることができる。これは、光子ガスのエネルギー密度のゆらぎが $\Delta_r = 4\delta T/T$ により温度のゆらぎと結びついているためである。観測的には、光子最終散乱面上の異なる位置で散乱された光は現在異なる方向から来る CMB に対応するので、この温度のゆらぎは CMB の温度が方向により異なるという現象を引き起こす。ただし、 t_{dec} での温度ゆらぎは平均温度 2.723K の 10^{-5} 程度しかないので、観測される温度異方性も同程度の非常に小さなものである。この小さな温度異方性を最初に検出したのはスムート (G.F.Smoot) が率いる COBE 衛星 DMR 観測であるが (2006 年ノーベル賞)、その後より精密な測定が Boomerang および MAXIMA-1 による気球、さらに WMAP による専用衛星観測により行われた。図 6.16 は WMAP により得られた温度地図である。

この温度地図そのものでは何も分からないが、それから温度ゆらぎの角度相関関数を計算してみると図 6.17 が得られる [?]。見事に最終散乱面での音響振動に対応する振動パターンが現れているのが分かる。ただし、この図では、角度相関関数 $\xi(s)$ を球面調和関数 $Y_\ell^m(s)$ で展開したときの展開係数の 2 乗 (パワースペクトル) が ℓ の関数として示されている。対応を見るため、宇宙膨張は平坦な物質優勢 LFRW モデルで近似できるとして、CMB の最終散乱面 $t = t_{\text{dec}}$ でのホライズンを見込む角度を求めてみよう。まず、最終散乱面で我々が観測する球面の赤

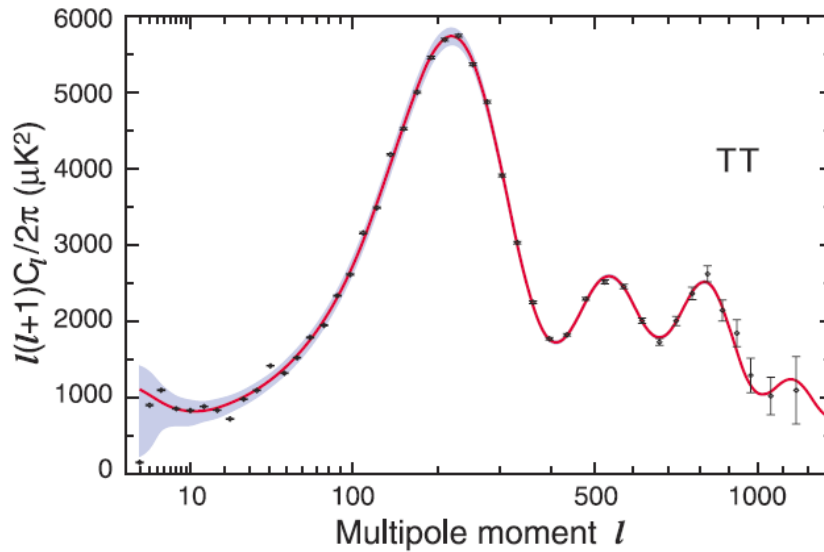


Fig. 32.— The nine-year WMAP TT angular power spectrum. The WMAP data are in black, with error bars, the best fit model is the red curve, and the smoothed binned cosmic variance curve is the shaded region. The first three acoustic peaks are well-determined.

図 6.17: WMAP 等により得られた最新の CMB 温度角度パワースペクトル [出典: WMAP9yr データ [?]]

道円の周長は $2\pi r_{\text{plc}}(t_{\text{dec}})$ なので、それと $t = t_{\text{dec}}$ でのホライズン直径の比は

$$\frac{2l_H(t_{\text{dec}})}{2\pi r_{\text{plc}}(t_{\text{dec}})} \simeq \frac{1}{100} \tag{6.17.1}$$

で与えられる。これより、音響振動の最初のピーク（第1Doppler peak）に対応する l の値は、対応する波長と上記の赤道円周長の比で与えられるので

$$\begin{aligned} l &= \frac{k_1}{a} r_{\text{plc}}(t_{\text{dec}}) = \frac{k_1}{(aH)_{\text{dec}}} \frac{2r_{\text{plc}}(t_{\text{dec}})}{l_H(t_{\text{dec}})} \\ &= \frac{100}{\gamma} \simeq 200 \end{aligned}$$

となる。これは、図 6.17 のピークの位置とぴったし一致することが分かる。

このピークの位置は宇宙のモデルパラメータに依存し、特に空間の曲率パラメータ Ω_K に敏感である。上記の結果は、実は宇宙が非常に平坦であること

$$|\Omega_K| \lesssim 0.1 \tag{6.17.2}$$

を意味する [?]. さらに、2 番目以降のピークの位置や詳細なパワースペクトルの形の情報と SNIa, BAO など他の観測情報を合わせると、多くの宇宙パラメータと宇宙初期のゆらぎについての情報を同時に決定することができる (図 6.20).

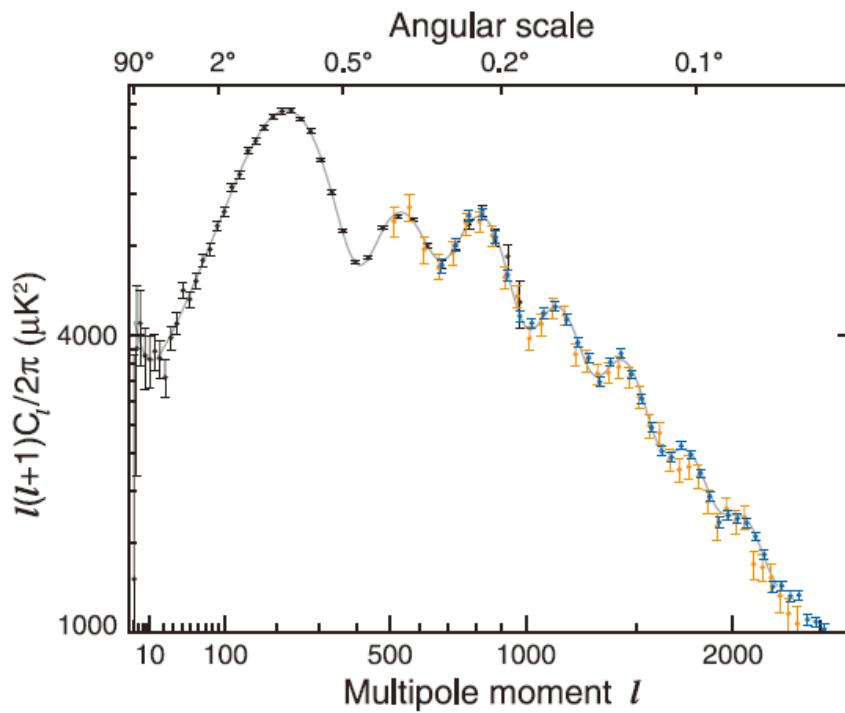


FIG. 1.— A compilation of the CMB data used in the nine-year WMAP analysis. The WMAP data are shown in black, the extended CMB data set – denoted ‘eCMB’ throughout – includes SPT data in blue (Keisler et al. 2011), and ACT data in orange, (Das et al. 2011). We also incorporate constraints from CMB lensing published by the SPT and ACT groups (not shown). The Λ CDM model fit to the WMAP data alone (shown in grey) successfully predicts the higher-resolution data.

図 6.18: WMAP 9r の観測と ACT および SPT の観測を合わせて得られる CMB 温度非等方性パワースペクトル

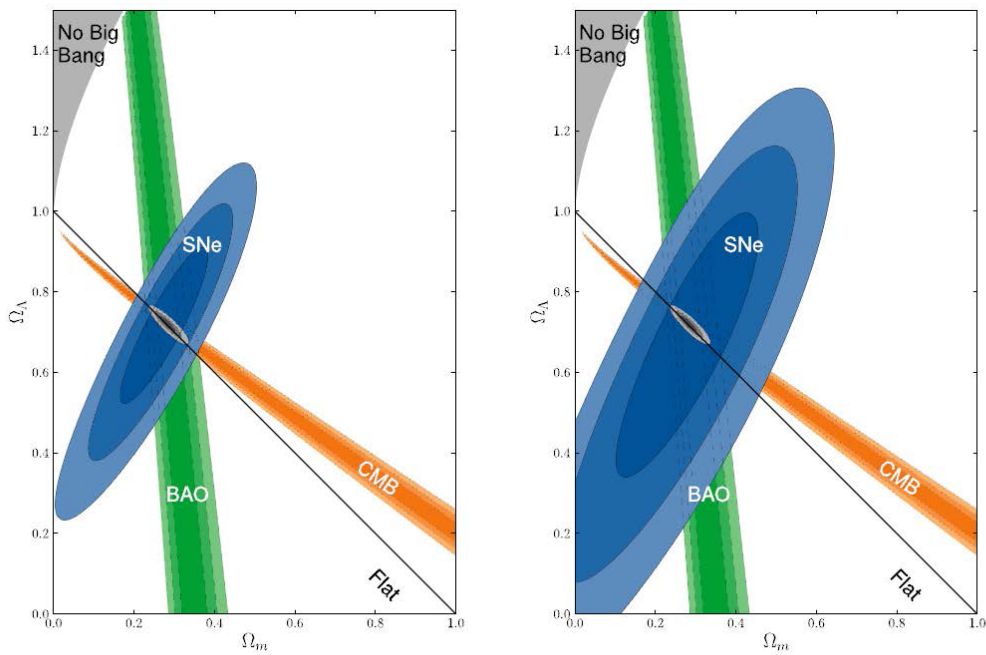


Figure 5. Λ CDM model: 68.3%, 95.4%, and 99.7% confidence regions of the $(\Omega_m, \Omega_\Lambda)$ plane from SNe Ia combined with the constraints from BAO and CMB. The left panel shows the SN Ia confidence region only including statistical errors while the right panel shows the SN Ia confidence region with both statistical and systematic errors.

図 6.19: HST Cluster SN Survey + CMB + BAOにより得られた宇宙パラメータへの制限 [Suzuki N et al: arXiv:1105.3470]

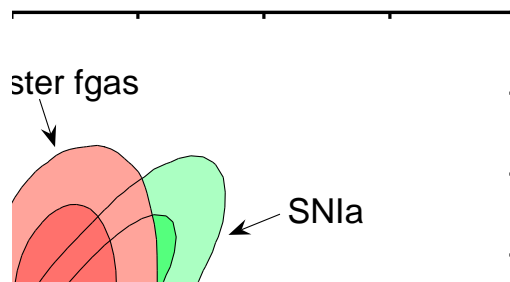


図 6.20: WMAP, BAO および X線観測から得られた宇宙パラメータへの制限 [?]

TABLE 2
MAXIMUM LIKELIHOOD Λ CDM PARAMETERS^a

Parameter	Symbol	WMAP data	Combined data ^b
Fit ΛCDM parameters			
Physical baryon density	$\Omega_b h^2$	0.02256	0.02240
Physical cold dark matter density	$\Omega_c h^2$	0.1142	0.1146
Dark energy density ($w = -1$)	Ω_Λ	0.7185	0.7181
Curvature perturbations, $k_0 = 0.002 \text{ Mpc}^{-1}$	$10^9 \Delta_{\mathcal{R}}^2$	2.40	2.43
Scalar spectral index	n_s	0.9710	0.9646
Reionization optical depth	τ	0.0851	0.0800
Derived parameters			
Age of the universe (Gyr)	t_0	13.76	13.75
Hubble parameter, $H_0 = 100h \text{ km/s/Mpc}$	H_0	69.7	69.7
Density fluctuations @ $8h^{-1} \text{ Mpc}$	σ_8	0.820	0.817
Baryon density/critical density	Ω_b	0.0464	0.0461
Cold dark matter density/critical density	Ω_c	0.235	0.236
Redshift of matter-radiation equality	z_{eq}	3273	3280
Redshift of reionization	z_{reion}	10.36	9.97

^a The maximum-likelihood Λ CDM parameters for use in simulations. Mean parameter values, with marginalized uncertainties, are reported in Table 4.

^b “Combined data” refers to WMAP+eCMB+BAO+ H_0 .

図 6.21: WMAP 9r での 6 個の Λ CDM モデルパラメーターの最適値とそれから誘導される他のパラメータ値

§6.18

宇宙パラメーター

観測値

- 空間曲率 (6 parameter model)
 - $\Omega_k = -0.0037^{+0.0044}_{-0.0042}$: WMAP-9yr only.
 - $\Omega_k = -0.001 \pm 0.0012$ (68%CL): WMAP-9yr + eCMB
 - $\Omega_k = -0.0027^{+0.0039}_{-0.0038}$: WMAP-9yr+eCMB+BAO+ H_0 .
- Neutrino 質量
 - $\sum_\nu m_\nu < 1.3\text{eV}$ (95%CL): WMAP-9yr.
 - $\sum_\nu m_\nu < 1.5\text{eV}$ (95%CL): WMAP-9yr+eCMB.
 - $\sum_\nu m_\nu < 0.56\text{eV}$ (95%CL): WMAP-9yr+eCMB+BAO.
 - $\sum_\nu m_\nu < 0.44\text{eV}$ (95%CL): WMAP-9yr+eCMB+BAO+ H_0 .
- 物質密度

- $\Omega_b = 0.0472 \pm 0.0010$: WMAP-9yr+BAO+ H_0 .
- $\Omega_c = 0.229 \pm 0.015$: WMAP-9yr+BAO+ H_0 .
- 状態方程式
 - $w = -1.023 \pm 0.090(\text{stat}) \pm 0.054(\text{sys})$ (flat, $w = \text{const} + \text{BAO}$)

Reference

- Hinshaw G et al (2012) arXiv:1212.5226[astro-ph]: NINE-YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE (WMAP) OBSERVATIONS: COSMOLOGICAL PARAMETER RESULTS

TABLE 4
SIX-PARAMETER Λ CDM FIT; WMAP PLUS EXTERNAL DATA^a

Parameter	WMAP	+eCMB	+eCMB+BAO	+eCMB+ H_0	+eCMB+BAO+ H_0
Fit parameters					
$\Omega_b h^2$	0.02264 ± 0.00050	0.02229 ± 0.00037	0.02211 ± 0.00034	0.02244 ± 0.00035	0.02223 ± 0.00033
$\Omega_c h^2$	0.1138 ± 0.0045	0.1126 ± 0.0035	0.1162 ± 0.0020	0.1106 ± 0.0030	0.1153 ± 0.0019
Ω_Λ	0.721 ± 0.025	0.728 ± 0.019	0.707 ± 0.010	0.740 ± 0.015	$0.7135^{+0.0095}_{-0.0096}$
$10^9 \Delta_{\mathcal{R}}^2$	2.41 ± 0.10	2.430 ± 0.084	$2.484^{+0.073}_{-0.072}$	$2.396^{+0.079}_{-0.078}$	2.464 ± 0.072
n_s	0.972 ± 0.013	0.9646 ± 0.0098	$0.9579^{+0.0081}_{-0.0082}$	$0.9690^{+0.0091}_{-0.0090}$	0.9608 ± 0.0080
τ	0.089 ± 0.014	0.084 ± 0.013	$0.079^{+0.011}_{-0.012}$	0.087 ± 0.013	0.081 ± 0.012
Derived parameters					
t_0 (Gyr)	13.74 ± 0.11	13.742 ± 0.077	13.800 ± 0.061	13.702 ± 0.069	13.772 ± 0.059
H_0 (km/s/Mpc)	70.0 ± 2.2	70.5 ± 1.6	68.76 ± 0.84	71.6 ± 1.4	69.32 ± 0.80
σ_8	0.821 ± 0.023	0.810 ± 0.017	$0.822^{+0.013}_{-0.014}$	0.803 ± 0.016	$0.820^{+0.013}_{-0.014}$
Ω_b	0.0463 ± 0.0024	0.0449 ± 0.0018	0.04678 ± 0.00098	0.0438 ± 0.0015	0.04628 ± 0.00093
Ω_c	0.233 ± 0.023	0.227 ± 0.017	0.2460 ± 0.0094	0.216 ± 0.014	$0.2402^{+0.0088}_{-0.0087}$
z_{eq}	3265^{+106}_{-105}	3230 ± 81	3312 ± 48	3184 ± 70	3293 ± 47
z_{reion}	10.6 ± 1.1	10.3 ± 1.1	10.0 ± 1.0	10.5 ± 1.1	10.1 ± 1.0

^a Λ CDM model fit to WMAP nine-year data combined with a progression of external data sets.

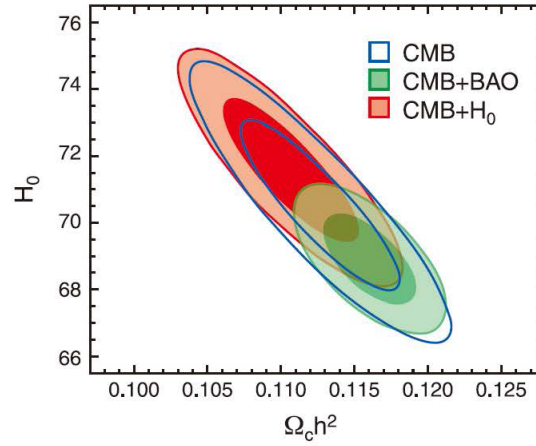


FIG. 5.— Measurements of $\Omega_c h^2$ and H_0 from CMB data only (blue contours, WMAP+eCMB), from CMB and BAO data (green contours, WMAP+eCMB+BAO), and from CMB and H_0 data (red contours, WMAP+eCMB+ H_0). The two non-CMB priors push the constraints towards opposite ends of the range allowed by the CMB alone, but they are not inconsistent.

図 6.22: WMAP 9ry: H_0 vs $h^2\Omega_c$

TABLE 7
RELATIVISTIC DEGREES OF FREEDOM AND BIG BANG NUCLEOSYNTHESIS^a

Parameter	WMAP	+eCMB	+eCMB+BAO	+eCMB+BAO+ H_0
Number of relativistic species ^b				
N_{eff}	> 1.7 (95% CL)	3.89 ± 0.67	2.96 ± 0.36	3.26 ± 0.35
n_s	0.988 ± 0.027	$0.985^{+0.018}_{-0.019}$	$0.9563^{+0.0100}_{-0.0102}$	0.9636 ± 0.0094
Primordial helium abundance ^b				
Y_{He}	< 0.42 (95% CL)	0.299 ± 0.027	0.295 ± 0.027	0.299 ± 0.027
n_s	0.973 ± 0.016	0.982 ± 0.013	0.973 ± 0.011	0.977 ± 0.011
Big bang nucleosynthesis ^c				
N_{eff}	...	2.92 ± 0.79	2.47 ± 0.37	2.83 ± 0.38
Y_{He}	...	$0.302^{+0.038}_{-0.039}$	$0.317^{+0.030}_{-0.031}$	$0.308^{+0.032}_{-0.031}$
n_s	...	0.978 ± 0.019	0.969 ± 0.012	0.976 ± 0.011

^a A complete list of parameter values for these models may be found at <http://lambda.gsfc.nasa.gov/>.

^b The parameters N_{eff} and Y_{He} comprise one additional parameter each in these table sections.

^c The parameters N_{eff} and Y_{He} are fit jointly in this section.

図 6.23: WMAP 9ry: BBN parameters

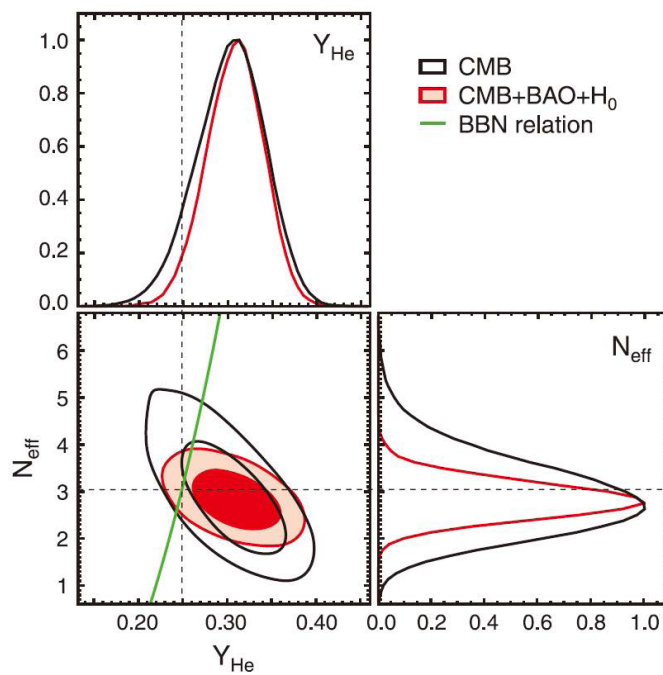


FIG. 9.— Joint, marginalized constraints (68% and 95% CL) on the primordial helium abundance, Y_{He} , and the energy density of “extra radiation species,” parameterized as an effective number of neutrino species, N_{eff} . These constraints are derived from the nine-year *WMAP*+eCMB data (black), and from *WMAP*+eCMB+BAO+ H_0 data (red). The green curve shows the predicted dependence of Y_{He} on N_{eff} from Big Bang Nucleosynthesis; the dashed lines indicate the standard model: $N_{\text{eff}} = 3.04$, $Y_{\text{He}} = 0.248$.

図 6.24: WMAP 9ry: N_{eff} vs Y

7

Axion Cosmology

§7.1

Homogeneous axion field

7.1.1 Evolution

作用積分

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{R}{2\kappa^2} - \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2 - V(\phi) + \dots \right]. \quad (7.1.1)$$

一様系

$$ds^2 = -N(t)^2 dt^2 + a(t)^2 d\mathbf{x}^2, \quad (7.1.2a)$$

$$\phi = \phi(t) \quad (7.1.2b)$$

では

$$S = L^3 \int dt N a^3 \left[-\frac{3}{\kappa^2 N^2} \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 + \frac{\dot{\phi}^2}{2N} - V + \dots \right]. \quad (7.1.3)$$

発展方程式

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V'(\phi) = 0, \quad (7.1.4a)$$

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{\kappa^2}{3} \rho. \quad (7.1.4b)$$

エネルギー密度と圧力 エネルギー運動量テンソルの一般形

$$T_{\mu\nu}^{\phi} = \partial_{\mu}\phi\partial_{\nu}\phi - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} ((\nabla\phi)^2 + 2V) \quad (7.1.5)$$

より

$$\rho_\phi = \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right), \quad P_\phi = \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi) \right). \quad (7.1.6)$$

WKB 近似解 発展方程式は次のように書き換えられる：

$$(a^{3/2}\phi)'' + \left(\tilde{m}^2 - \frac{3}{4}H^2 - \frac{3\ddot{a}}{2a} \right) (a^{3/2}\phi) = 0, \quad (7.1.7)$$

$$\tilde{m}^2 = \frac{V'}{\phi} \quad (7.1.8)$$

これより,

- $\tilde{m} \ll H$ のとき, ポテンシャル項が無視でき

$$(a^3\dot{\phi})' \simeq 0 \quad (7.1.9)$$

より

$$\dot{\phi} \simeq \dot{\phi}_i \left(\frac{a(t_i)}{a(t)} \right)^3, \quad (7.1.10a)$$

$$\phi = \phi_i + \dot{\phi}_i \int_{t_i} dt \left(\frac{a(t_i)}{a(t)} \right)^3 \rightarrow \phi_* = \phi_i + O(\dot{\phi}_i/H_i). \quad (7.1.10b)$$

よって, ρ と p は

$$\rho_\phi \simeq V(\phi_*), \quad P \simeq -\rho. \quad (7.1.11)$$

すなわち, スカラ場は DE として振る舞う.

- $\tilde{m} \gg H$ のとき, \tilde{m} が ϕ に依存せず, 時間に緩やかに依存する関数 $m(t)$ で与えられるとすると,

$$a^{3/2}\phi \simeq \frac{A}{\sqrt{m}} \cos \left(\int m dt + \text{const} \right) \quad (7.1.12)$$

より,

$$\phi \simeq \phi_* \left(\frac{m_*}{m} \right)^{1/2} \left(\frac{a_*}{a} \right)^{3/2} \cos \left(\int m dt + \text{const} \right) \quad (7.1.13)$$

ここで, $t = t_*$ は $m \approx H$ となる時刻. エネルギー密度と圧力は

$$\rho_\phi \simeq \frac{mm_*}{2} \phi_*^2 \left(\frac{a_*}{a} \right)^3, \quad (7.1.14a)$$

$$P_\phi = -\rho_\phi \cos \left(2 \int m dt + \text{const} \right) \quad (7.1.14b)$$

したがって, $1/m \ll 1/H$ より長い時間スケールで平均すると,

$$\bar{\rho}_\phi \propto 1/a^3, \quad \bar{P}_\phi \simeq 0 \quad (7.1.15)$$

となり，スカラ場はダストとして振る舞う．すなわち，CDMとなる．ただし， m が時間変化するときには，長い時間スケールでは「粒子数」が保存される：

$$\frac{a^3 \rho}{m} \simeq \frac{1}{2} m_* a_*^3 \phi_i^2 = \text{const.} \quad (7.1.16)$$

厳密解 $a \propto t^\gamma$ の時には，発展方程式は厳密に解け， $t \rightarrow 0$ で $\phi \rightarrow \phi_i$ となる会いは

$$\phi = \phi_i \Gamma\left(\frac{3\gamma+1}{2}\right) \left(\frac{2}{mt}\right)^{\frac{3\gamma-1}{2}} J_{\frac{3\gamma-1}{2}}(mt). \quad (7.1.17)$$

$mt \gg 1$ では，この解は

$$\phi = \phi_i \left(\frac{a_*}{a}\right)^{3/2} \cos\left(mt - \frac{3}{4}\gamma\pi\right). \quad (7.1.18)$$

ただし， t_* を

$$mt_* = 2 \left(\Gamma\left(\frac{3\gamma+1}{2}\right) / \sqrt{\pi} \right)^{2/(3\gamma)} \quad (7.1.19)$$

と取った． H/m で表すと，この条件は

$$\frac{H_*}{m_*} = \frac{\gamma}{2} \left(\frac{\sqrt{\pi}}{\Gamma\left(\frac{3\gamma+1}{2}\right)} \right)^{2/(3\gamma)} = \begin{cases} 0.61 & ; \gamma = 1/2, \\ 2/3 & ; \gamma = 2/3 \end{cases}. \quad (7.1.20)$$

7.1.2 Present abundance

DE となる場合 ($m \lesssim H_0$)： 現在の振幅は初期値のままなので，

$$\rho_\phi = \sum \frac{1}{2} m^2 (\epsilon f_a)^2. \quad (7.1.21)$$

よって，アクシオンは宇宙項に寄与する：

$$\Omega_\phi = \sum \frac{\epsilon^2}{6} \left(\frac{m}{H_0}\right)^2 \left(\frac{f_a}{m_{\text{pl}}}\right)^2 \lesssim \sum \left(\frac{\epsilon f_a}{m_{\text{pl}}}\right)^2 \quad (7.1.22)$$

したがって，現在の DE を説明するには， $\epsilon f_a \sim m_{\text{pl}}$ かつ $m \sim H_0$ であるか， $m \lesssim H_0$ となるアクシオンが非常に多種類存在しないといけない．

DM となる場合 ($m \gg H_0$)： 現在は振動フェーズで，そのエネルギー密度は

$$\rho_\phi = \sum m a_*^3 \times \frac{1}{2} m_* (\epsilon f_a)^2. \quad (7.1.23)$$

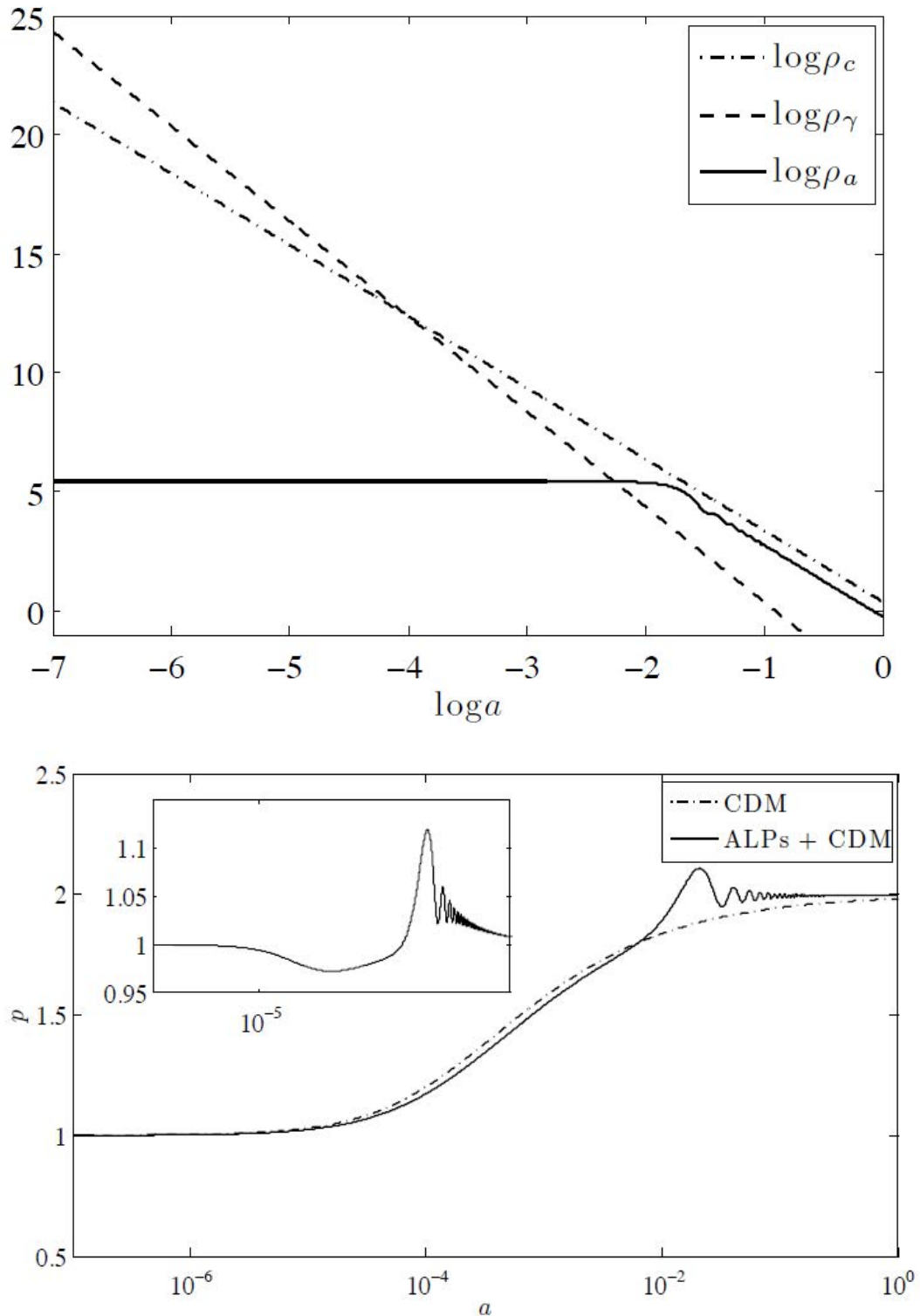


図 7.1: アクシオンのエネルギー密度と膨張指数の時間変化. $m/H_0 = 10^3, \Omega_c = 0.8, \Omega_\Lambda = 0$ [Marsh DJE, Ferreira PG: PRD82(2010)103528[arXiv:1009.3501]]

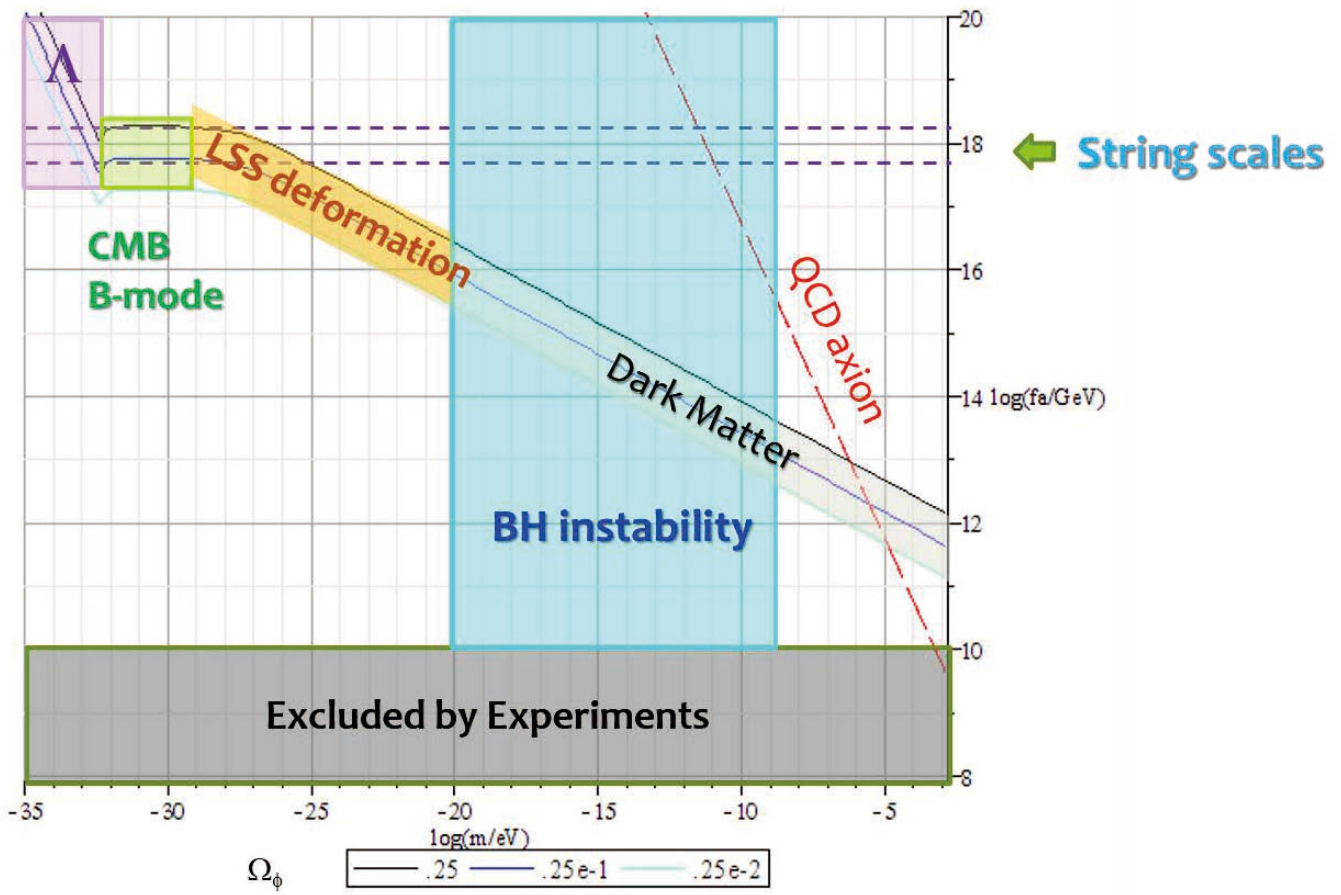


図 7.2: Axion abundance and relevant phenomena

よって,

$$\begin{aligned} H_0 < m_* < H_{\text{eq}} : \Omega_\phi &= \sum \frac{3}{2} \left(\frac{m}{m_*} \right) \left(\frac{a_*^3 H_*^2}{H_0^2} \right) \left(\frac{\epsilon f_a}{m_{\text{pl}}} \right)^2 \\ &\approx \sum \left(\frac{\epsilon f_a}{m_{\text{pl}}} \right)^2 \end{aligned} \quad (7.1.24a)$$

$$\begin{aligned} H_{\text{eq}} < m_* : \Omega_\phi &\approx \sum \frac{3}{2} \left(\frac{m}{m_*} \right) \Omega_R^{3/4} \left(\frac{m}{3H_0} \right)^{1/2} \left(\frac{\epsilon f_a}{m_{\text{pl}}} \right)^2 \\ &\approx \sum \left(\frac{m}{m_{\text{eq}}} \right)^{1/2} \left(\frac{\epsilon f_a}{m_{\text{pl}}} \right)^2 \end{aligned} \quad (7.1.24b)$$

QCD axion 有限温度での axion 質量は, dilute gas 近似で

$$\frac{m_a(T)}{m_a} = 7.7 \cdot 10^{-2 \pm 0.6} \left(\frac{\Lambda}{T} \right)^{3.7 \pm 0.1} \quad (7.1.25)$$

これより,

$$m_a(T) \approx H \quad (7.1.26)$$

となる温度 T_* は

$$T_* = \begin{cases} 1.2 \cdot 10^{\pm 0.15} \text{GeV} \left(\frac{6}{N} \frac{f_a}{10^{12} \text{GeV}} \right)^{-0.175 \pm 0.03} \Lambda_{200}^{0.7} & ; f_a \lesssim 1.6 \times 10^{18 \pm 1.7} \frac{N}{6} \Lambda_{200}^{-2.3} \text{GeV} \\ 1.6 \cdot 10^{-1 \pm 0.03} \text{GeV} \left(\frac{6}{N} \frac{f_a}{10^{18} \text{GeV}} \right)^{-1/2} & ; f_a \gtrsim 1.6 \times 10^{18 \pm 1.7} \frac{N}{6} \Lambda_{200}^{-2.3} \text{GeV} \end{cases} \quad (7.1.27)$$

[Turner MS: prd33(1986) 889]

QCD axion は $m_a(T) < m_a$ の時期に振動を始める. このため, 振動を始める時期は m_a が一定の場合より遅れる:

$$a_* \propto H_*^{-1/2} \simeq m_a(T_*)^{-1/2}. \quad (7.1.28)$$

よって, 現在の存在量は, m_a が一定の場合と比べて多くなる:

$$\frac{a_*^3 m_a(T_*)}{(a_*)^3 m_a} = \left(\frac{m_a}{m_a(T_*)} \right)^{3/2} \left(\frac{m_a(T_*)}{m_a} \right) = \left(\frac{m_a}{m_a(T_*)} \right)^{1/2} > 1. \quad (7.1.29)$$

具体的な現在の存在量は,

$$\Omega_a = 0.2 \times 10^{\pm 0.5} \left(\frac{f_a}{10^{12} \text{GeV}} \right)^{1.175} \gamma^{-1} h^{-2} \left(\frac{a_i}{2\pi f_a} \right)^2 \quad (7.1.30)$$

Constraint

$$\Omega_a h^2 = 0.5 \left(\frac{f_a/\xi}{10^{12} \text{GeV}} \right)^{7/6} [\theta_i^2 + \sigma_\theta^2] \gamma, \quad (7.1.31)$$

$$\begin{aligned} \Omega_a h^2 &< 0.12, \quad \gamma = 1, \quad \theta_i^2 = \pi^2/3 \\ \Rightarrow f_a &< 3 \times 10^{11} \text{GeV}, \quad m_a > 2 \times 10^{-5} \text{eV}. \end{aligned} \quad (7.1.32)$$

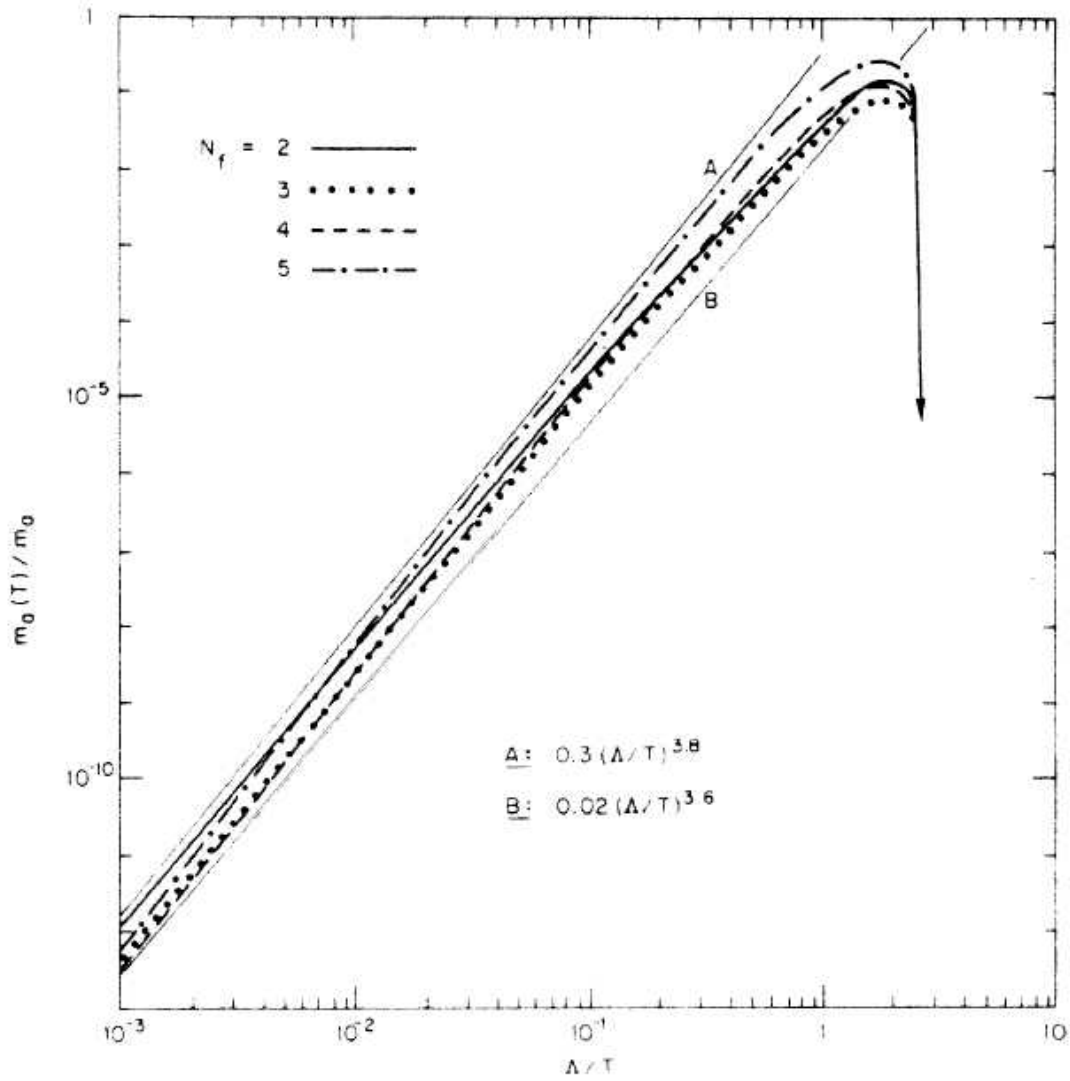


図 7.3: 有限温度でのアクシオン質量

§7.2

CMB B-mode (birefringence)

References

- Kosowsky, A.: Cosmic Microwave Background Polarization, *Annals of Physics* 246, 49-85 (1996).

7.2.1 偏光の記述

- 偏光テンソル

$$\rho_{pq} = e_p^i e_q^j \langle : E_i E_j : \rangle = \rho_{qp}, \quad \tilde{\rho}_{pq} = e_p^i e_q^j \langle : E_i \tilde{E}_j : \rangle = -\tilde{\rho}_{qp} \quad (7.2.1)$$

ここで, $\tilde{E}_i(t) = E_i(t + \pi/(2\omega))$.

- Stokes パラメーター

$$I = \rho_p^p, \quad Q = \rho_{11} - \frac{1}{2}I, \quad U = \rho_{12} \quad V = \tilde{\rho}_{12} \quad (7.2.2)$$

これより, 偏光行列を

$$P = \left(\rho_{pq} - \frac{1}{2}I\delta_{pq} \right) = \begin{pmatrix} Q & U \\ U & -Q \end{pmatrix} \quad (7.2.3)$$

により定義すると, 偏光ベクトルの回転に対して,

$$P \mapsto R(\theta)PR(\theta)^{-1} \quad (7.2.4)$$

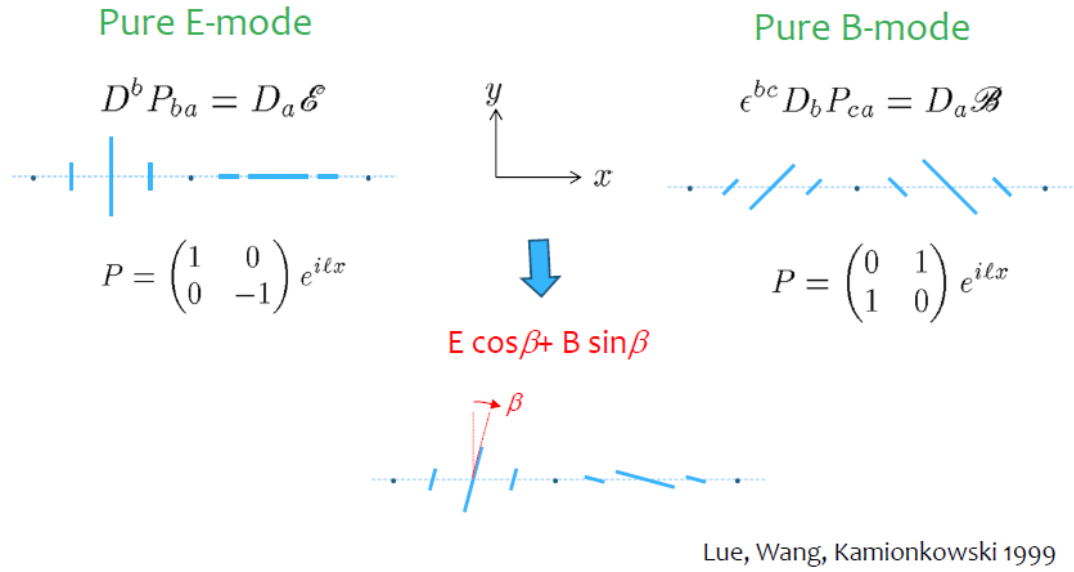
と変換する. したがって, P は天球上の 2 階対称テンソルと見なすことができる.

7.2.2 EモードとBモード

天球上での放射強度のゆらぎ $\delta I(\Omega)$ は, 調和関数を用いて

$$\delta I(\Omega) = g(\omega/T)\bar{I} \sum_{l,m} \Theta_l^m Y_l^m(\Omega); \quad g(x) = x\partial_x f(x)/f(x) \quad (7.2.5)$$

と展開される. ここで, Θ_l^m は温度ゆらぎ $\delta T/T$ の展開係数に相当する量である.



Lue, Wang, Kamionkowski 1999

図 7.4: Flat sky 近似での E モードと B モード

同様に，偏光テンソルは，

$$\hat{\Delta} \mathcal{P}_l^m = -(l^2 + l - 4) \mathcal{P}_l^m, \quad \text{Tr}(\mathcal{P}_l^m) = 0 \quad (7.2.6)$$

を満たす 2 階対称調和テンソル \mathcal{P}_l^m を用いて，

$$P(\Omega) = g(\omega/T) \bar{I} \sum_{l,m} (E_l^m \mathcal{P}_{E_l^m} + B_l^m \mathcal{P}_{B_l^m}) \quad (7.2.7)$$

と展開される．ここで， \mathcal{P}_E と \mathcal{P}_B はそれぞれ

$$\hat{D}_b (\mathcal{P}_{E_l^m})_a^b = -c_l \hat{D}_a Y_l^m, \quad (7.2.8a)$$

$$\hat{D}_b (\mathcal{P}_{B_l^m})_a^b = -c_l \epsilon_{ab} \hat{D}^b Y_l^m \quad (7.2.8b)$$

を満たす parity even および odd な調和テンソルの独立な基底で，対応する偏光テンソル分布の各成分はそれぞれ E モードおよび B モードと呼ばれる．

7.2.3 Flat sky 近似

l の十分大きいモードでは天球の曲率を無視できる．このようなモードに対しては，局所的に球面調和関数の代わりに平面波を用いることができる：(赤道の近傍で)

$$\begin{aligned} Y_l^m &\propto P_l^m(\cos \theta) e^{im\phi} \sim ((-1)^m \sqrt{\frac{2}{\pi \sin \theta}} \frac{\Gamma(l+m+1)}{\Gamma(l+3/2)}) \cos \left[\left(l + \frac{1}{2} \right) \theta + \frac{m\pi}{2} - \frac{\pi}{4} \right] e^{im\phi} \\ &\rightarrow e^{i\mathbf{k} \cdot \boldsymbol{\theta}} \end{aligned} \quad (7.2.9)$$

対応して,

$$\mathcal{P}_{ab} \rightarrow M_{ab} e^{i\mathbf{k} \cdot \boldsymbol{\theta}} \quad (7.2.10)$$

とおくと, M_{ab} はトレースがゼロの対称行列で, Eモードの条件は

$$M_{ab} k^b = -c_l k^a \Rightarrow M_E \propto \begin{pmatrix} (k^1)^2 - (k^2)^2 & 2k^1 k^2 \\ 2k^1 k^2 & -(k^1)^2 + (k^2)^2 \end{pmatrix}. \quad (7.2.11)$$

Bモードの条件は

$$M_{ab} k^b = -c_l \epsilon_{ab} k^b \Rightarrow M_B \propto \begin{pmatrix} -2k^1 k^2 & (k^1)^2 - (k^2)^2 \\ (k^1)^2 - (k^2)^2 & 2k^1 k^2 \end{pmatrix} \quad (7.2.12)$$

特に, 偏光ベクトルを $\epsilon_{1//\mathbf{k}}$ と取ると,

$$M_E \propto \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \Leftrightarrow U = 0, \quad (7.2.13a)$$

$$M_B \propto \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \Leftrightarrow Q = 0. \quad (7.2.13b)$$

これは, この基底のもとで, 直線偏光の方向が

- E-mode : $E_1 = 0$ or $E_2 = 0 \Leftrightarrow \mathbf{E} // \mathbf{k}$ or $\perp \mathbf{k}$.
- B-mode : $E_1 = \pm E_2 \Leftrightarrow \mathbf{E}$ と \mathbf{k} が 45° .

7.2.4 フラックス強度テンソル

電磁場のモード展開と偏光ベクトル Lorentz ゲージのもとで, 自由電磁場の4元ポテンシャル A_μ は, 生成消滅演算子を用いて

$$A_\mu(x) = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \frac{1}{2\omega} \sum_p (e_{p\mu}(\mathbf{k}) a_p(\mathbf{k}) e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}} + e_{p\mu}^*(\mathbf{k}) a_p(\mathbf{k})^\dagger e^{-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}}), \quad (7.2.14)$$

と表される. ここで, $e_{p\mu}(\mathbf{k})$ は次の条件を満たす偏光ベクトルである:

$$e_p^\mu e_{q\mu}^* = \delta_{pq}, \quad k^\mu e_{p\mu} = 0. \quad (7.2.15)$$

k^μ に比例したベクトルを e_p^μ に加えることはゲージ変化にあたり, 物理的な効果は無いことに注意する. また, a_p と a_p^\dagger は次の通常の相対論的に規格化された交換関係を満たすものとする:

$$[a_p(\mathbf{k}), a_q(\mathbf{k}')] = 0, \quad [a_p(\mathbf{k}), a_q(\mathbf{k}')^\dagger] = (2\pi)^3 2\omega \delta_{pq} \delta^3(\mathbf{k} - \mathbf{k}'). \quad (7.2.16)$$

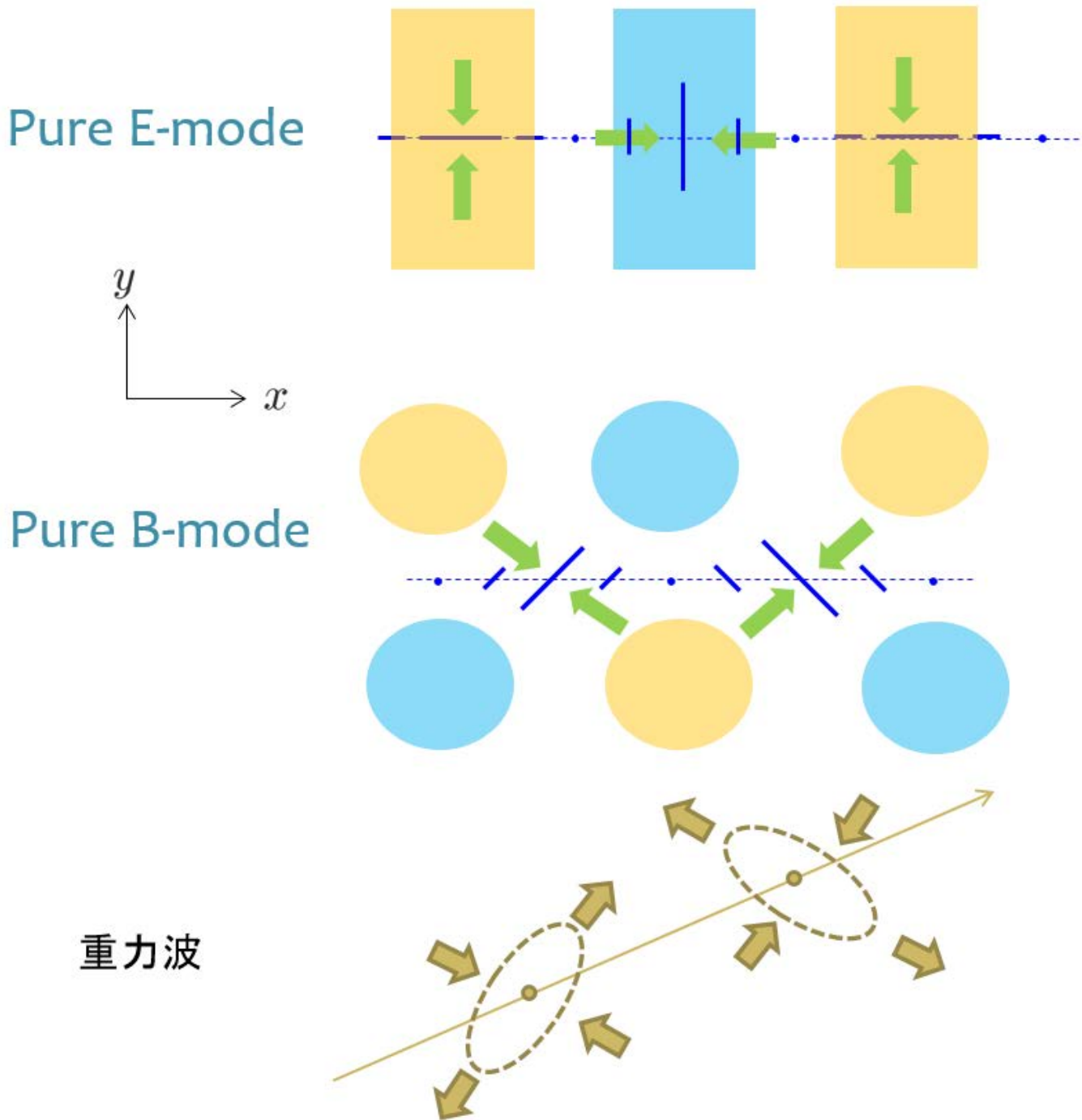


図 7.5: E-mode と B-mode

対応して、電場 \mathbf{E} と磁場 \mathbf{B} は

$$\mathbf{E} = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \frac{1}{2} \sum_p (\epsilon_p(\mathbf{k}) a_p(\mathbf{k}) e^{ik \cdot x} + \epsilon_p^*(\mathbf{k}) a_p(\mathbf{k})^\dagger e^{-ik \cdot x}), \quad (7.2.17a)$$

$$\mathbf{B} = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \frac{1}{2\omega} \mathbf{k} \times \sum_p (\epsilon_p(\mathbf{k}) a_p(\mathbf{k}) e^{ik \cdot x} + \epsilon_p^*(\mathbf{k}) a_p(\mathbf{k})^\dagger e^{-ik \cdot x}), \quad (7.2.17b)$$

と表される。ここで、 ϵ_{pj} は

$$\epsilon_{pj} := e_{pj} - \frac{k_j}{\omega} e_{p0}, \quad (7.2.18)$$

で定義され、次の関係式を満たす:

$$\mathbf{k} \cdot \epsilon_p = 0, \quad \epsilon_p^* \cdot \epsilon_q = \delta_{pq}. \quad (7.2.19)$$

観測される電場成分 実際には観測される電場の偏光成分 \mathcal{E}_p は、ウィンドウ関数 $W(x)$ と検出器の偏光基底 ϵ_p^o を用いて

$$\mathcal{E}_p = \int d^3x W(x) \epsilon_p^o \cdot \mathbf{E}(t_0, \mathbf{x}). \quad (7.2.20)$$

と表される。これは、生成消滅演算子を用いて

$$\mathcal{E}_p = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \frac{1}{2} \left[\sum_q a_q(\mathbf{k}) (\epsilon_p^o \cdot \epsilon_q(\mathbf{k})) \hat{W}(\mathbf{k}) e^{-i\omega t} + \text{cc} \right], \quad (7.2.21)$$

と表される。ここで、

$$\hat{W}(\mathbf{k}) = \int d^3x e^{ik \cdot x} W(\mathbf{x}). \quad (7.2.22)$$

フラックス密度テンソルとフラックス偏光行列 電磁場の生成消滅演算子の相関がフラックス偏光行列 $\rho_{pq}(\mathbf{k})$ を用いて、次式で与えられるとする:

$$\langle a_p(\mathbf{k}) a_q(\mathbf{k}') \rangle = 0, \quad \langle a_p(\mathbf{k})^\dagger a_q(\mathbf{k}') \rangle = 2(2\pi)^3 \rho_{pq}(\mathbf{k}) \delta^3(\mathbf{k} - \mathbf{k}'). \quad (7.2.23)$$

観測される、電場の相関は

$$\langle : \mathcal{E}_p \mathcal{E}_q : \rangle = \epsilon_p^{ol} \epsilon_q^{oj} \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} |\hat{W}(\mathbf{k})|^2 \rho_{(lj)}(\mathbf{k}), \quad (7.2.24a)$$

$$\langle : \mathcal{E}_p \tilde{\mathcal{E}}_q : \rangle = \epsilon_p^{ol} \epsilon_q^{oj} \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} |\hat{W}(\mathbf{k})|^2 (-i) \rho_{[lj]}(\mathbf{k}), \quad (7.2.24b)$$

ここで

$$\rho_{ij}(\mathbf{k}) = \sum_{p,q} \epsilon_{pi}^*(\mathbf{k}) \epsilon_{qj}(\mathbf{k}) \rho_{pq}(\mathbf{k}), \quad (7.2.25)$$

また、 $\tilde{\mathcal{E}}_p$ は \mathcal{E}_p のモード展開で位相 $t\omega$ を $\pi/2$ 進めることにより得られる。

Stokes parameters

$$I = \sum_p \epsilon_p^{oj} \epsilon_p^{ol} \rho_{(jl)}, \quad Q = (\epsilon_1^{oj} \epsilon_1^{ol} - \epsilon_2^{oj} \epsilon_2^{ol}) \rho_{(jl)}, \quad U = 2\epsilon_1^{oj} \epsilon_2^{ol} \rho_{(jl)}, \quad V = (-2i)\epsilon_1^{oj} \epsilon_2^{ol} \rho_{[jl]} \quad (7.2.26)$$

これより，フラックス密度テンソル $\rho_{ij}(\mathbf{k})$ は，輻射場の強度と偏光を偏光基底に依存せずに記述する方法を与える。

7.2.5 偏光に対する Boltzmann 方程式

曲がった時空での電磁場伝播 (WKB) 近似 Maxwell 方程式

$$\nabla^\mu F_{\mu\nu} = 0. \quad (7.2.27)$$

の WKB 近似解は

$$A_\mu(x) = a_\mu(x) e^{iS(x)}, \quad (7.2.28)$$

ここで， $k := \nabla S$ ， $a_\mu(x)$ および $S(x)$ は次式を満たす：

$$k := \nabla S \Rightarrow k \cdot k \approx 0 \Rightarrow \nabla_k k \approx 0, \quad (7.2.29)$$

$$\nabla_k a_\mu = -\frac{1}{2} \square S a_\mu \approx 0. \quad (7.2.30)$$

4次元フラックス密度テンソルに対する Boltzmann 方程式 4次元的な偏光ベクトル $e^\mu(k, x)$

$$\nabla_k e^\mu(k, x) = 0, \quad k_\mu e^\mu(k, x) = 0, \quad (7.2.31)$$

を用いて，フラックス密度テンソル ρ_{jl} を4次元テンソル

$$\rho^{\mu\nu} = \sum_{p,q} e_p^\mu e_q^\nu \rho_{pq}. \quad (7.2.32)$$

に拡張すると，このテンソルは次の一般化された Boltzmann 方程式を満たす：

$$(k^\mu/k^0 \nabla_\mu + f^i \partial_{k^i}) \rho^{\mu\nu}(x, \mathbf{k}) = C^{\mu\nu}(\rho), \quad (7.2.33)$$

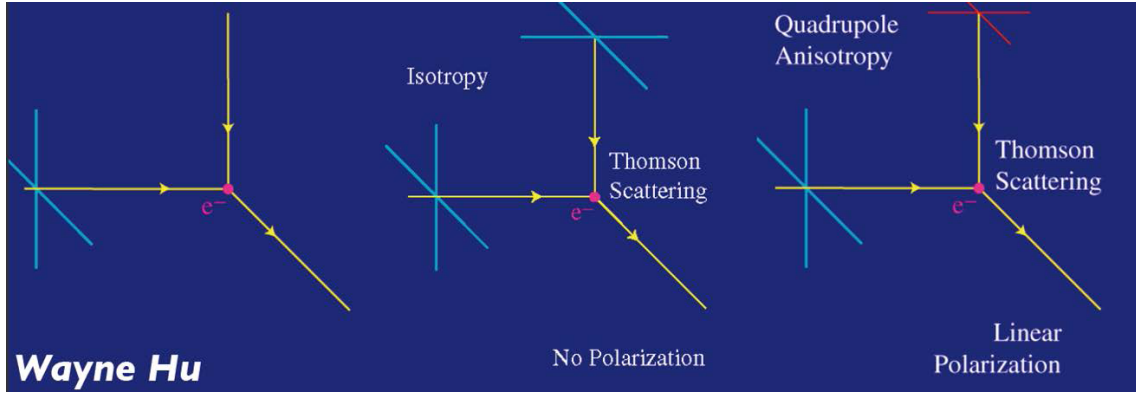


図 7.6: 電子との散乱による直線偏光の生成

7.2.6 最終散乱面での偏光

宇宙晴れ上がり以前の時期での標準偏光基底 \mathbf{K} をゆらぎのモード関数 ($\propto \exp(i\mathbf{K}\cdot\mathbf{x})$) の波数ベクトルとして,

$$\epsilon_p(k) = \frac{1}{a} \hat{\epsilon}_p(k); \quad (7.2.34)$$

$$\hat{\epsilon}_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - (\hat{k} \cdot \hat{K})^2}} \left(\hat{K} - (\hat{k} \cdot \hat{K}) \hat{k} \right), \quad (7.2.35)$$

$$\hat{\epsilon}_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - (\hat{k} \cdot \hat{K})^2}} \hat{K} \times \hat{k}, \quad (7.2.36)$$

ここで,

$$\hat{k} = \mathbf{k}/|\mathbf{k}|, \quad \hat{K} = \mathbf{K}/|\mathbf{K}|. \quad (7.2.37)$$

通常の球座標系を

$$\hat{K} = (0, 0, 1), \quad \hat{k} = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta), \quad (7.2.38)$$

となるように取ると, 偏光基底の成分は

$$\hat{\epsilon}_1 = (\cos \theta \cos \phi, \cos \theta \sin \phi, -\sin \theta), \quad (7.2.39a)$$

$$\hat{\epsilon}_2 = (-\sin \phi, \cos \phi, 0). \quad (7.2.39b)$$

ゆらぎのモード展開 輻射場の場の分布関数による記述がよい宇宙晴れ上がり以前の時期において, フラックス密度テンソルのゆらぎ $\delta\rho_{\mu\nu}$ を波数 \mathbf{K} のフーリエモードに展開する:

$$\delta\rho_{\mu\nu}(t_{\text{ls}}, \mathbf{x}, \mathbf{k}) = \int d^3K e^{i\mathbf{K}\cdot\mathbf{x}} \rho_{\mu\nu}^{(1)}(\mathbf{K}; \mathbf{k}). \quad (7.2.40)$$

上記のように偏光基底を選ぶと、各摂動モードについてすべてのベクトル摂動量は \hat{K} に比例するので、

$$\rho_{pq}^{(1)} = \epsilon_1^{\mu*} \epsilon_2^\nu \rho_{\mu\nu}^{(1)}(\mathbf{K}; \mathbf{k}) \quad (7.2.41)$$

で定義される $\rho_{pq}^{(1)}$ は ω と $\mu = \cos\theta = \hat{K} \cdot \hat{k}$ のみに依存する:

$$\rho_{pq}^{(1)} = \rho_{pq}^{(1)}(\mathbf{K}; \omega, \mu). \quad (7.2.42)$$

これに注意して、Stokes パラメータに対応する偏光温度ゆらぎ Δ_X ($X = I, Q, U, V$) を次の様に定義する:

$$\Delta_I(\mathbf{K}, q, \mu) = \left(\frac{\omega}{4} \frac{\partial \rho^{(0)}(\omega)}{\partial \omega} \right)^{-1} \left\{ \rho_{11}^{(1)}(\mathbf{K}; \omega, \mu) + \rho_{22}^{(1)}(\mathbf{K}; \omega, \mu) \right\}, \quad (7.2.43a)$$

$$\Delta_Q(\mathbf{K}, q, \mu) = \left(\frac{\omega}{4} \frac{\partial \rho^{(0)}(\omega)}{\partial \omega} \right)^{-1} \left\{ \rho_{11}^{(1)}(\mathbf{K}; \omega, \mu) - \rho_{22}^{(1)}(\mathbf{K}; \omega, \mu) \right\}, \quad (7.2.43b)$$

$$\Delta_U(\mathbf{K}, q, \mu) = \left(\frac{\omega}{4} \frac{\partial \rho^{(0)}(\omega)}{\partial \omega} \right)^{-1} \left\{ \rho_{12}^{(1)}(\mathbf{K}; \omega, \mu) + \rho_{21}^{(1)}(\mathbf{K}; \omega, \mu) \right\}, \quad (7.2.43c)$$

$$\Delta_V(\mathbf{K}, q, \mu) = -i \left(\frac{\omega}{4} \frac{\partial \rho^{(0)}(\omega)}{\partial \omega} \right)^{-1} \left\{ \rho_{12}^{(1)}(\mathbf{K}; \omega, \mu) - \rho_{21}^{(1)}(\mathbf{K}; \omega, \mu) \right\}, \quad (7.2.43d)$$

ここで、 $q = a\omega$.

スカラ型ゆらぎによる偏光 スカラ型ゆらぎに対しては、 $\Delta_X = \Delta_X^s(t, K, q, \mu)$ の時間発展方程式は次式で与えられる [3, 15]:

$$\begin{aligned} \partial_t \Delta_I^s + \frac{iK\mu}{a} \Delta_I^s - 4 \left(\partial_t \Phi + \frac{2iK\mu}{a} \Psi \right) \\ = -\sigma_T \bar{n}_e \left[\Delta_I^s - \Delta_{I0}^s + 4v\mu - \frac{1}{2} P_2(\mu) (\Delta_{I2}^s + \Delta_{Q0}^s - \Delta_{Q2}^s) \right] \end{aligned} \quad (7.2.44a)$$

$$\begin{aligned} \partial_t \Delta_Q^s + \frac{iK\mu}{a} \Delta_Q^s \\ = -\sigma_T \bar{n}_e \left[\Delta_Q^s + \frac{1}{2} (1 - P_2(\mu)) (\Delta_{I2}^s + \Delta_{Q0}^s - \Delta_{Q2}^s) \right], \end{aligned} \quad (7.2.44b)$$

$$\partial_t \Delta_U^s + \frac{iK\mu}{a} \Delta_U^s = -\sigma_T \bar{n}_e \Delta_U^s, \quad (7.2.44c)$$

$$\partial_t \Delta_V^s + \frac{iK\mu}{a} \Delta_V^s = -\sigma_T \bar{n}_e \left(\Delta_V^s - \frac{3\mu}{2} \Delta_{V1}^s \right), \quad (7.2.44d)$$

ここで、 v は速度ゆらぎ $\mathbf{v} = v\hat{K}$ の大きさ、また、 $i = s, +, x$ と $X = I, Q, U, V$ に対し、

$$\Delta_{Xl}^i(q) := \int_{-1}^1 \frac{d\mu}{2} P_l(\mu) \Delta_X^i(q, \mu). \quad (7.2.45)$$

この方程式より、スカラ型ゆらぎに対しては、 $\Delta_U = \Delta_V = 0$ が成り立つ。すなわち、Eモードのみを生成し、Bモードは生成されない。

テンソル型ゆらぎ テンソル型ゆらぎに対するゆらぎ偏光成分 Δ_X^t は、重力波の + 偏光と \times 偏光に対応する decouple した2つのモード $\tilde{\Delta}_{X,\epsilon}^t$ ($\epsilon = +, \times$) の重ね合わせとなる：

$$\Delta_I^t = (1 - \mu^2) \cos(2\phi) \tilde{\Delta}_{I,+}^t + (1 - \mu^2) \sin(2\phi) \tilde{\Delta}_{I,\times}^t, \quad (7.2.46a)$$

$$\Delta_Q^t = (1 + \mu^2) \cos(2\phi) \tilde{\Delta}_{Q,+}^t + (1 + \mu^2) \sin(2\phi) \tilde{\Delta}_{Q,\times}^t, \quad (7.2.46b)$$

$$\Delta_U^t = -2\mu \sin(2\phi) \tilde{\Delta}_{U,+}^t + 2\mu \cos(2\phi) \tilde{\Delta}_{U,\times}^t, \quad (7.2.46c)$$

各成分 $\tilde{\Delta}_{X,\epsilon}^t$ の発展方程式は、

$$\partial_t \tilde{\Delta}_{I,\epsilon}^t + \frac{iK\mu}{a} \tilde{\Delta}_{I,\epsilon}^t - 2\partial_t h_\epsilon = -\sigma_T \bar{n}_e (\tilde{\Delta}_{I,\epsilon}^t + \tilde{\Lambda}_\epsilon), \quad (7.2.47a)$$

$$\partial_t \tilde{\Delta}_{Q,\epsilon}^t + \frac{iK\mu}{a} \tilde{\Delta}_{Q,\epsilon}^t = -\sigma_T \bar{n}_e (\tilde{\Delta}_{Q,\epsilon}^t - \tilde{\Lambda}_\epsilon), \quad (7.2.47b)$$

$$\tilde{\Delta}_{U,\epsilon}^t = \tilde{\Delta}_{Q,\epsilon}^t, \quad (7.2.47c)$$

$$\partial_t \tilde{\Delta}_{V,\epsilon}^t + \frac{iK\mu}{a} \tilde{\Delta}_{V,\epsilon}^t = -\sigma_T \bar{n}_e \tilde{\Delta}_{V,\epsilon}^t, \quad (7.2.47d)$$

ここで、

$$\tilde{\Lambda}_\epsilon := -\frac{3}{70} \tilde{\Delta}_{I4,\epsilon}^t + \frac{1}{7} \tilde{\Delta}_{I2,\epsilon}^t - \frac{1}{10} \tilde{\Delta}_{I0,\epsilon}^t + \frac{3}{70} \tilde{\Delta}_{Q4,\epsilon}^t + \frac{6}{7} \tilde{\Delta}_{Q2,\epsilon}^t + \frac{3}{5} \tilde{\Delta}_{Q0,\epsilon}^t. \quad (7.2.48)$$

これより、テンソル型ゆらぎは、一般に $\Delta_U \neq 0$ 。したがって B モードを生成する。

7.2.7 アクシオンによる B モード生成

Lagrangian アクシオン場 ϕ が電磁場と CS 結合するとする：

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2} *d\phi \wedge d\phi - \Lambda_a^2 U(\phi/f_a) - \frac{1}{2} *F \wedge F - \frac{g_{\phi\gamma}}{2} \phi F \wedge F \quad (7.2.49)$$

場の方程式

$$d *F + g_{\phi\gamma} d\phi \wedge F = 0 \Leftrightarrow \nabla^\nu F_{\nu\mu} - \frac{1}{2} g_{\phi\gamma} \nabla^\nu \phi \epsilon_{\nu\mu\alpha\beta} F^{\alpha\beta} = 0 \quad (7.2.50)$$

特に、 $\phi = \phi(t)$ のとき、ゲージ条件

$$\mathbf{E} = \dot{\mathbf{A}}, \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}; \quad \nabla \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (7.2.51)$$

のもとで、空間的に平坦な FLRW モデルでの場の方程式は

$$(-\partial_\eta^2 + \Delta) \mathbf{A} + \frac{1}{2} g_{\phi\gamma} a \dot{\phi} \nabla \times \mathbf{A} = 0 \quad (7.2.52)$$

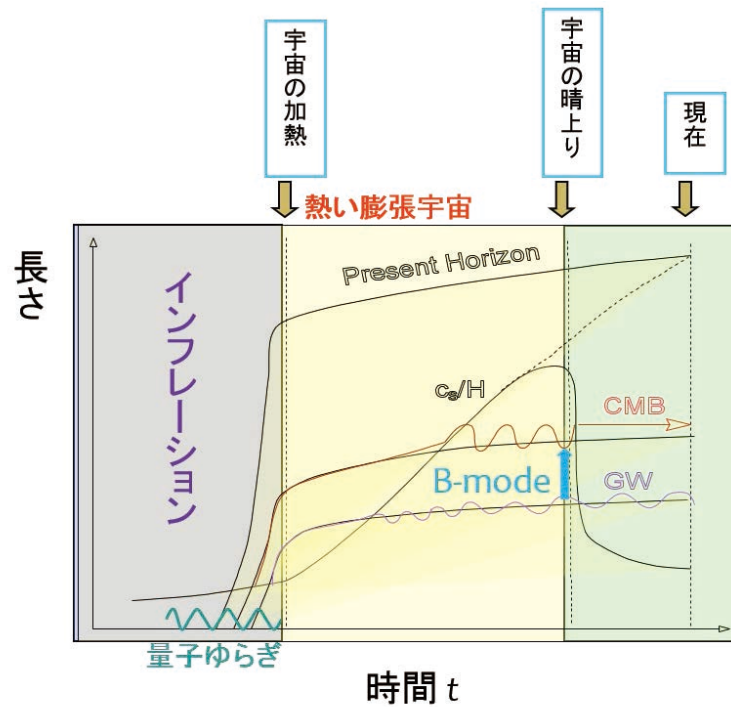


図 7.7: 宇宙晴れ上がり時における CMB B-mode 生成

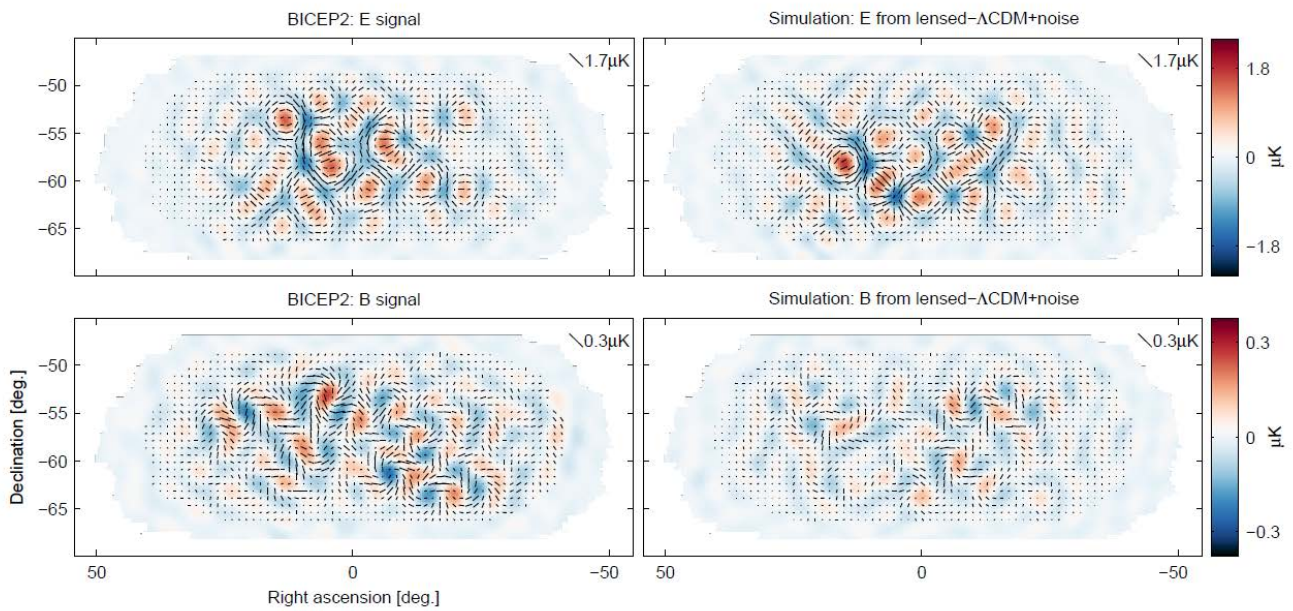


FIG. 3.— *Left:* BICEP2 apodized E -mode and B -mode maps filtered to $50 < \ell < 120$. *Right:* The equivalent maps for the first of the lensed- Λ CDM+noise simulations. The color scale displays the E -mode scalar and B -mode pseudoscalar patterns while the lines display the equivalent magnitude and orientation of linear polarization. Note that excess B -mode is detected over lensing+noise with high signal-to-noise ratio in the map ($s/n > 2$ per map mode at $\ell \approx 70$). (Also note that the E -mode and B -mode maps use different color/length scales.)

図 7.8: BICEP2 の観測した CMB B-mode パターン

平面波解 波が z 方向に伝搬しているとき,

$$\mathbf{A} = (a_x, a_y, 0)e^{ikz} \Rightarrow \left(\partial_\eta^2 + k^2 \pm \frac{1}{2}g_{\phi\gamma}ak\dot{\phi}f_a \right) (a_x \pm ia_y) = 0 \quad (7.2.53)$$

k が大きいときの WKB 解は

$$A_x \pm iA_y = \text{const} \cdot \exp\{-ik(\eta - z) \mp i\beta\} \quad (7.2.54)$$

ここで,

$$\beta = \frac{1}{4}g_{\phi\gamma} \int^t \dot{\phi} dt = \frac{1}{4}g_{\phi\gamma} \Delta\phi \quad (7.2.55)$$

Bモード生成 これは, $\dot{\phi} \neq 0$ のとき, 電磁波の偏光ベクトルが伝搬と共に回転することを示している. CMB の場合, 最終散乱面から現在までの回転角は

$$\Delta\beta = \frac{1}{4}g_{\phi\gamma} \int_{t_{\text{ls}}}^{t_0} \dot{\phi} dt = \frac{1}{4}g_{\phi\gamma} (\phi(t_{\text{ls}}) - \phi(t_0)) \quad (7.2.56)$$

ϕ の振動周期 $2\pi/m$ が, 最終散乱面の厚み $\delta t_{\text{ls}} \sim 10\text{kpc}$ に比べて大きく, かつ宇宙年齢以下のとき, すなわち

$$10^{-33}\text{eV} < m < 10^{-27}\text{eV} \quad (7.2.57)$$

のとき, この回転は E モードから B モードを生成する.

その割合を決める $\Delta\beta$ の大きさは, axion decay constant f_a に依存しないことが特徴的である.

$$\Delta\beta \lesssim \frac{\pi}{4\sqrt{3}} f_a g_{\phi\gamma} \sim \frac{\alpha}{4\sqrt{3}} \sim 10^{-3} \quad (7.2.58)$$

上記の条件を満たすアクシオン場が N 種あると, 一般に $\Delta\beta$ は \sqrt{N} 倍となる.

観測よりの制限

- Current limit: $\Delta\beta < 2^\circ = 3.5 \times 10^{-2}$.
- Planck: accuracy $< 0.1^\circ$

§7.3

CMB-axion conversion

References

- Tashiro H: PTEP 2014 (2014) 6, 06B107.
”CMB spectral distortions and energy release in the early universe”
- PRISM Collaboration: JCAP1402 (2014)006 [arXiv:1310.1554 [astro-ph.CO]]
- Tashiro H, Silk J, Marsh DJE: PRD88 (2013) 125024 [arXiv:1308.0314] (PRISM/Pixie).
- Mirizzi A, Redondo J, Sisl G: JCAP0908 (2009)001 [arXiv:0905.4865] (COBE FIRAS).

Basic equation アクシオン・光子変換の基礎方程式は

$$\left(-i\frac{d}{cdt} - M\right) \begin{pmatrix} A_{\parallel} \\ \phi \end{pmatrix} = 0; \quad (7.3.1)$$

$$M = \frac{1}{2\omega} \begin{pmatrix} m_{\gamma}^2 & 2\omega gB \\ 2\omega gB & m_a^2 \end{pmatrix}. \quad (7.3.2)$$

ここで,

$$m_{\gamma}^2 = \omega_p^2 + \left(\frac{1}{n^2} - 1\right) \omega^2, \quad (7.3.3a)$$

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi\alpha n_e}{m_e}. \quad (7.3.3b)$$

M は次のように対角化される :

$$M = R(\theta) \begin{pmatrix} m_+^2/2\omega & 0 \\ 0 & m_-^2/2\omega \end{pmatrix} R(-\theta), \quad (7.3.4)$$

$$m_{\pm}^2 = \frac{m_{\gamma}^2 + m_a^2}{2} \pm \left[\left(\frac{m_a^2 - m_{\gamma}^2}{2} \right)^2 + (\omega gB)^2 \right]^{1/2}, \quad (7.3.5)$$

$$\cos(2\theta) = \frac{m_a^2 - m_{\gamma}^2}{[(m_a^2 - m_{\gamma}^2)^2 + (2\omega gB)^2]^{1/2}}. \quad (7.3.6)$$

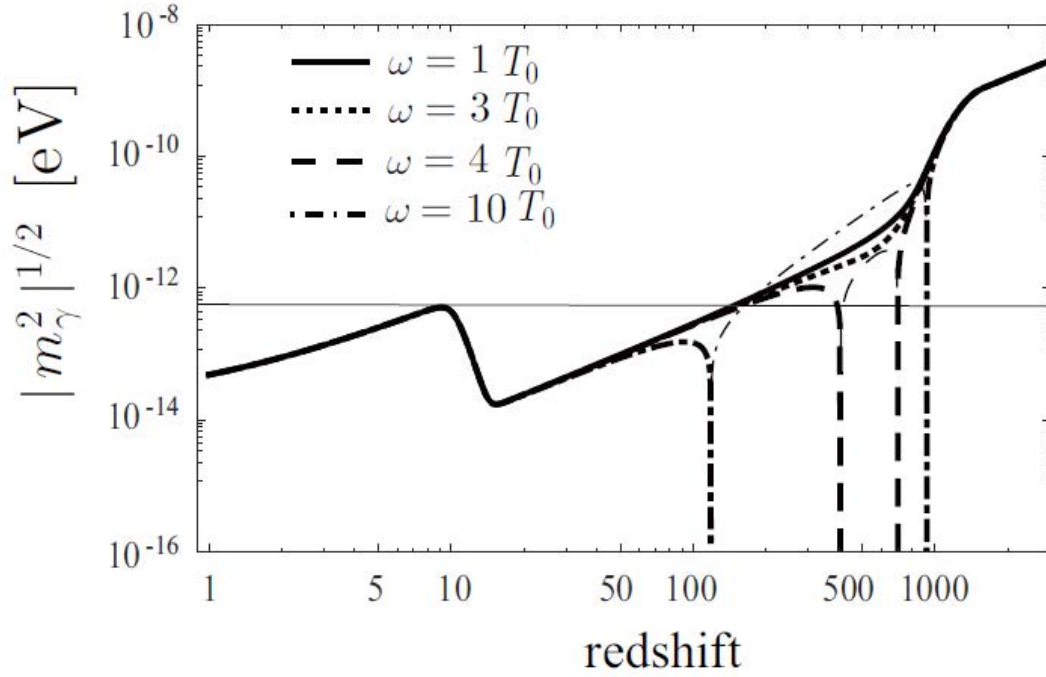


図 7.9: m_γ の時間変化

Non-resonant conversion

$$P = \frac{1}{1 + (\omega_*/\omega)^2} \sin^2 \left[\int dt \frac{gB}{2} \sqrt{1 + (\omega_*/\omega)^2} \right]. \quad (7.3.7)$$

ここで,

$$\omega_* = \frac{|m_a^2 - m_\gamma^2|}{2gB} \simeq 0.7 \text{GeV} \frac{m_a^2 - m_\gamma^2}{(10^{-10} \text{eV})^2} \left(\frac{1 \text{ng}}{B} \right) \left(\frac{g^{-1}}{10^{10} \text{GeV}} \right), \quad (7.3.8a)$$

$$(gB)^{-1} \simeq 2.8 \times 10^{24} \text{cm} \left(\frac{g^{-1}}{10^{10} \text{GeV}} \right) \left(\frac{1 \text{ng}}{B} \right) \simeq 0.92 \text{Mpc} \left(\frac{g^{-1}}{10^{10} \text{GeV}} \right) \left(\frac{1 \text{ng}}{B} \right), \quad (7.3.8b)$$

$$ct_{\text{ls}} \simeq 3.5 \times 10^{23} \text{cm}. \quad (7.3.8c)$$

よって,

$$\omega \sim 10^{-2} \text{eV}, \quad m_a \sim 10^{-10} \text{eV}, \quad g \sim 10^{-10} \text{GeV}^{-1}, \quad B \sim 1 \text{ng} \quad (7.3.9)$$

に対して,

$$P = O(10^{-22})!! \quad (7.3.10)$$

Resonant conversion 進化の途中で, $m_a = m_\gamma$ となる場合には, 共鳴変換が起きる:

$$P \approx 1 - p \approx \frac{k_r r \sin^2(2\theta_r)}{2 \cos(2\theta_r)}. \quad (7.3.11)$$

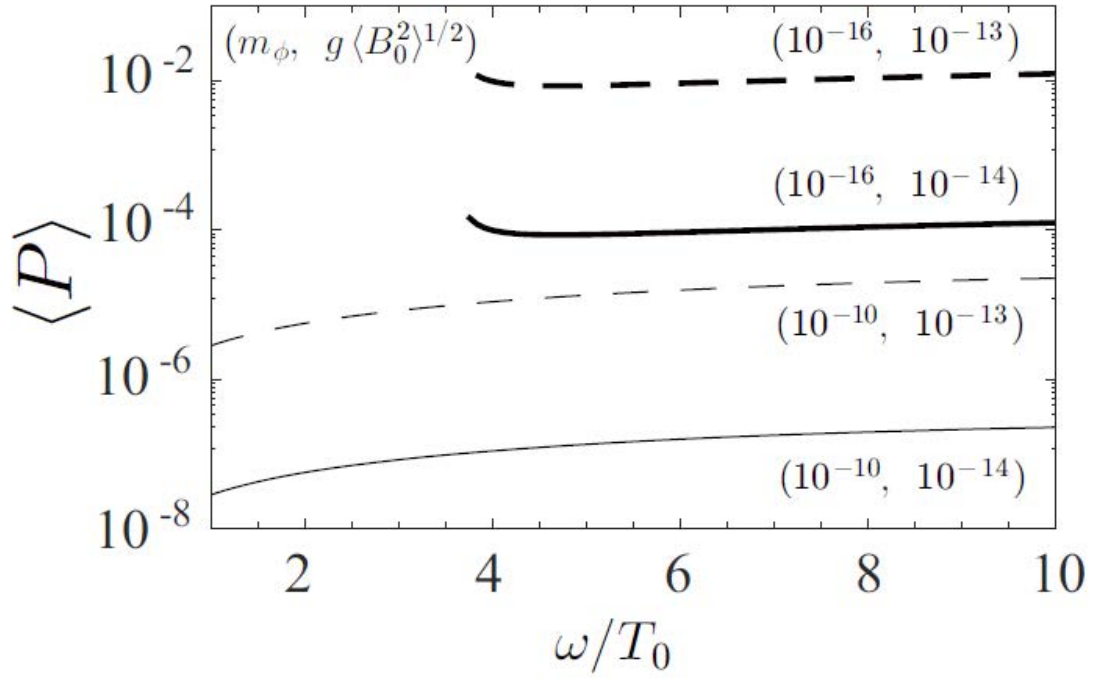


図 7.10: $P_{\gamma a}$ の m_a 依存性

ここで,

$$p = \exp\left(-\frac{k_r r \sin^2(2\theta_r)}{2 \cos(2\theta_r)}\right), \quad (7.3.12)$$

$$r = \left|\frac{d}{dt} \ln m_\gamma^2\right|_{t=t_r}^{-1}. \quad (7.3.13)$$

θ_r は

$$\cos(2\theta_r) = \frac{m_a^2}{(m_a^4 + (2\omega_r g B_r)^2)^{1/2}} \approx 1, \quad (7.3.14a)$$

$$\sin(2\theta_r) = \frac{2\omega_r g B_r}{(m_a^4 + (2\omega_r g B_r)^2)^{1/2}} \approx \frac{\omega_r}{\omega_*} \quad (7.3.14b)$$

よって,

$$k_r \sim 10^3 \text{ cm}^{-1}, \quad r \sim 10^{23} \text{ cm} \Rightarrow P \simeq 1 \quad (7.3.15)$$

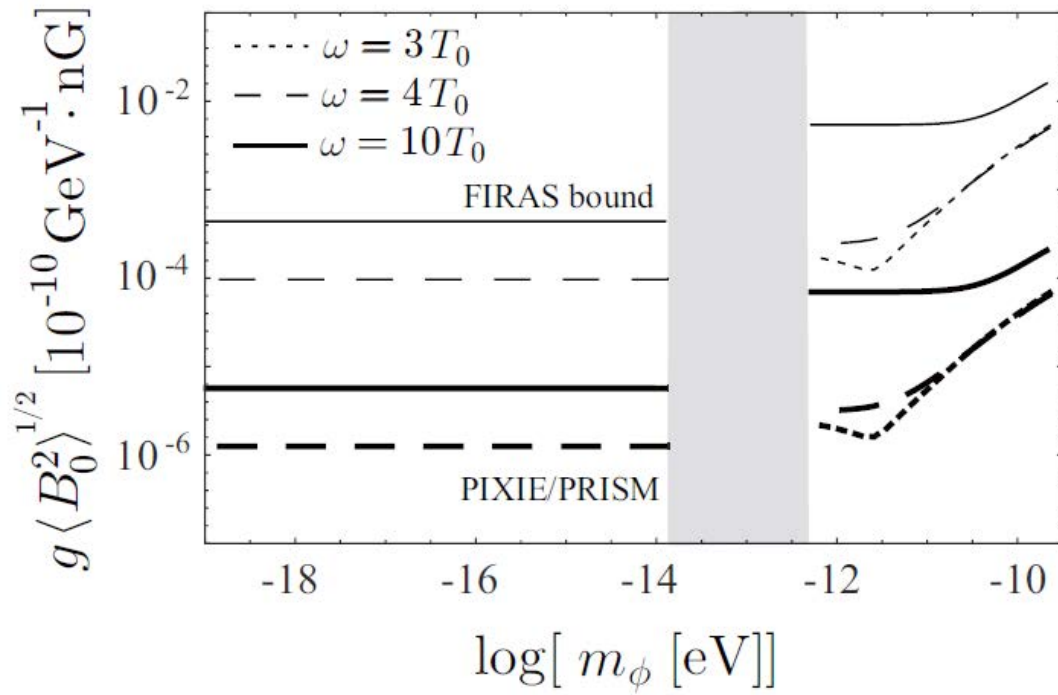


図 7.11: gB への制限

§7.4

Influence on LSS

7.4.1 Bosonic DM

References

- Wayne Hu, R Barkana, A Gruzinov: "Cold and fuzzy dark matter", PRL85, 1158 (2000) [astro-ph/0003365]

スカラ場の方程式

$$\frac{1}{\sqrt{-g}} \partial_\mu (\sqrt{-g} g^{\mu\nu} \partial_\nu \phi) - m^2 \phi = 0. \quad (7.4.1)$$

振動フェーズでのニュートン近似

$$\phi(t, x) = \frac{1}{\sqrt{2m}} [\psi(t, x)e^{-imt} + \text{h.c.}], \quad (7.4.2a)$$

$$ds^2 = -(1 + 2\Psi(t, x))dt^2 + a^2(1 - 2\Psi(t, x))dx^2. \quad (7.4.2b)$$

$|\dot{\psi}| \ll m|\psi|$, $|\dot{\Psi}| \ll m$ のとき, ϕ の方程式は次の Schrödinger 方程式で近似できる:

$$i \left(\partial_t + \frac{3}{2}H \right) \psi \approx \left(-\frac{1}{2ma^2} \Delta + m\Psi \right) \psi \quad (7.4.3)$$

エネルギー-運動量テンソル

$$T_{\mu\nu} = \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} ((\nabla \phi)^2 + m^2 \phi^2) \quad (7.4.4)$$

より,

$$\rho = \langle T_{00} \rangle = m|\psi|^2, \quad (7.4.5a)$$

$$\rho v^j = -a \langle T_0^j \rangle = \frac{i}{2a} (\psi \partial_j \psi^* - \psi^* \partial_j \psi), \quad (7.4.5b)$$

$$P_j^i = \langle T_j^i \rangle = \frac{1}{ma^2} \left[\partial_{(j} \psi \partial_{k)} \psi^* - \frac{1}{2} \left\{ \partial \psi \cdot \partial \psi^* - ima^2 (\dot{\psi} \psi^* - \dot{\psi}^* \psi) \right\} \delta_j^i \right]. \quad (7.4.5c)$$

よって,

$$\psi \propto e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}} \quad (7.4.6)$$

なら,

$$\rho = mn = m|\psi|^2, \quad \mathbf{p} = m\mathbf{v} = \frac{\mathbf{k}}{a}, \quad P_j^i = mnv^i v_j. \quad (7.4.7)$$

Jeans length 波動関数に RPA 近似を適用すると,

$$\langle P_j^i \rangle = \frac{1}{3} v^2 mn \delta_j^i \Rightarrow c_s^2 = \frac{dP}{d\rho} = \frac{v^2}{3}. \quad (7.4.8)$$

したがって, Jeans 長は

$$\frac{a}{k_J} = \frac{c_s}{\sqrt{16\pi G\rho/3}} = \frac{c_s}{\sqrt{2H}} \quad (7.4.9)$$

ここで,

$$c_s = \frac{v}{\sqrt{3}} = \frac{k_J}{\sqrt{3}ma} \quad (7.4.10)$$

とおくと,

$$k_J = \sqrt{6mHa} \Rightarrow aL_J \approx \frac{1}{\sqrt{mH}} \quad (7.4.11)$$

を得る.

しかし, RPA は少なくとも, de Broglie 波長 $2\pi/k$ よりゆらぎのスケール $2\pi/k$ が大きくないといけませんが, 今はこの条件が満たされていない.

7.4.2 Powerspectrum suppression

Scattering and free streaming いま、アクシオン場の自己相互作用は無視できるとしており、アクシオンと他の物質の相互作用は弱いので、アクシオンの重力場による散乱が無視できれば、本質的にアクシオン系は free stream する粒子の集団と見なされる。この重力による散乱効果を見るために、 ρv^i の時間変化を計算すると、

$$\partial_t(\rho v^i) \approx -3H\rho v^i - \frac{\rho}{a}\partial_j\Psi + \partial^j P_j^i \quad (7.4.12)$$

$L \gg L_J$ となるスケールを考えると、ある力の寄与を無視すると、運動量密度が $1/H$ の時間で有意に変わる条件は

$$1 \lesssim \frac{(\rho v)^{\cdot}}{H\rho v} \sim \frac{1}{H\rho v} \frac{\rho}{a} \partial\Psi \sim \frac{G\rho a L}{Hv} \sim mH(aL)^2 \quad (7.4.13)$$

よって、

$$L \gtrsim L_J \quad (7.4.14)$$

すなわち、 $L \ll L_J$ ではアクシオンは free stream する、一方、 $L \gg L_J$ では、散乱によりアクシオンに対する RPA 近似が良い精度で成り立つので、重力不安定が起きる。

Spectrum deformation 各時刻で、 $L < L_J$ となるゆらぎは free streaming damping を起こすため Cold DM のゆらぎを抑制する。一方、 $L > L_J$ となるゆらぎは影響を受けない。ただし、 L_J が時間と共に変化するため、アクシオンが存在する場合のスペクトルは、無い場合に図??のような抑制因子を掛けたものとなる。この図で、 $1/k_m$ は $H < m$ となって以降での L_J の最大値（これは $H = m$ の時の値）、 $1/k_{J,0}$ は現在の値である。

k_m と $k_{J,0}$ の質量依存性は以下の表式で与えられる（図 7.14）。

- $m > m_{\text{eq}} \sim 10^{-27} \text{eV}$ のとき：

$$k_m \approx \left(\frac{m}{2 \cdot 10^{-24} \text{eV}} \right)^{1/2} \text{Mpc}^{-1}, \quad (7.4.15a)$$

$$k_{J,0} \approx \left(\frac{m}{2 \cdot 10^{-25} \text{eV}} \right)^{1/2} \text{Mpc}^{-1}. \quad (7.4.15b)$$

- $m < m_{\text{eq}} \sim 10^{-27} \text{eV}$ のとき：

$$k_m \approx \left(\frac{m}{4 \cdot 10^{-22} \text{eV}} \right)^{1/3} \text{Mpc}^{-1}, \quad (7.4.16a)$$

$$k_{J,0} \approx \left(\frac{m}{2 \cdot 10^{-25} \text{eV}} \right)^{1/2} \text{Mpc}^{-1}. \quad (7.4.16b)$$

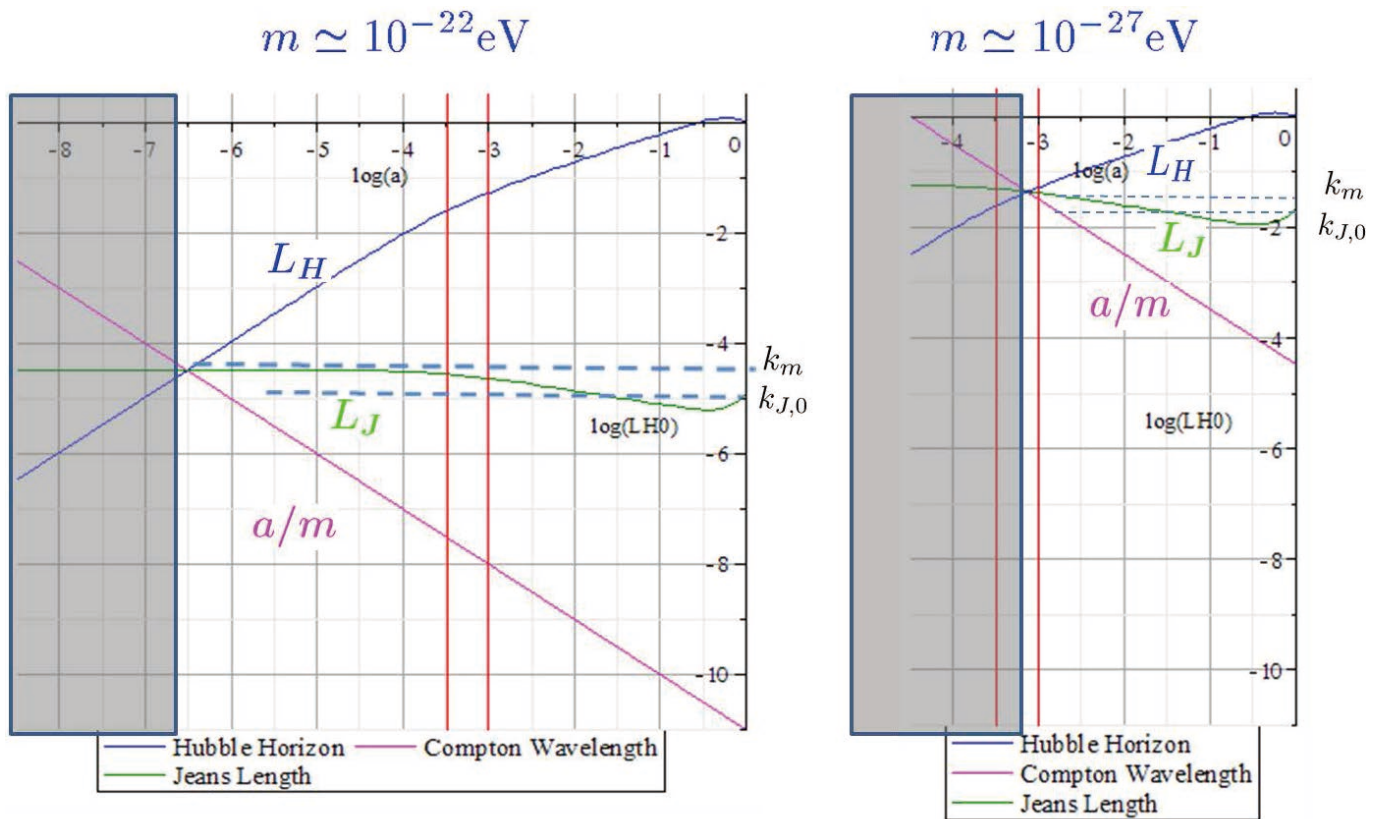


図 7.12: アクシオン Jeans 長の振る舞い

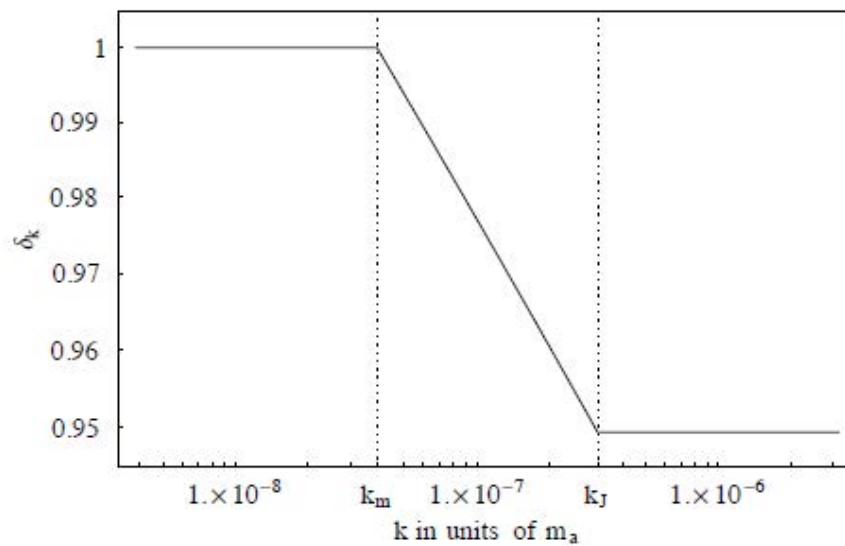


図 7.13: アクシオンによる CDM パワースペクトルの変形

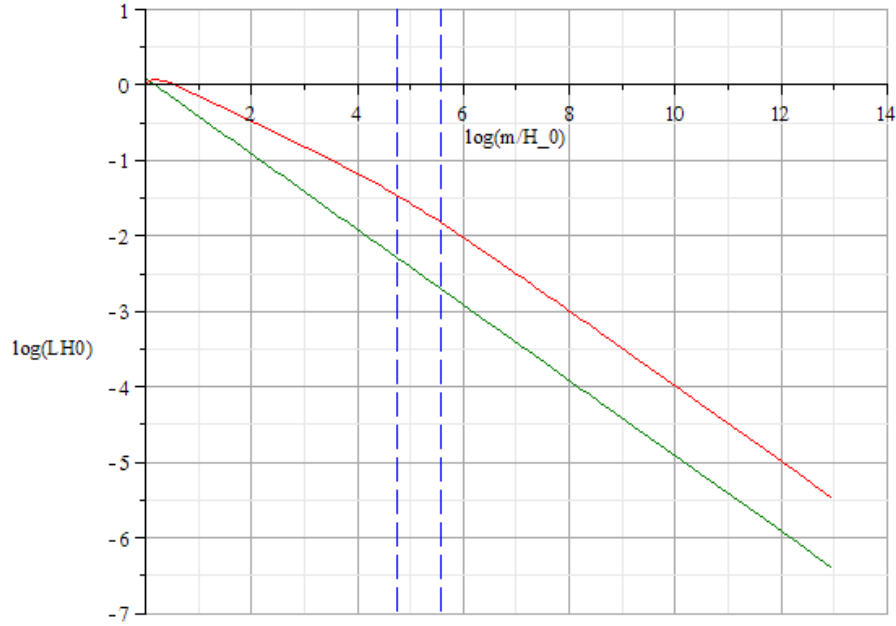


図 7.14: スペクトル変形波長の質量依存性

7.4.3 Estimation of deformation

単純化された解析的評価では,

$$S(z) = \left(\frac{z_{\text{eq}} + 1}{z + 1} \right)^{-3\Omega_a/5\Omega_m} \approx 1 - \frac{3\Omega_a}{5\Omega_m} \ln \frac{z_{\text{eq}} + 1}{z + 1}. \quad (7.4.17)$$

ここで,

$$\frac{\Omega_a}{\Omega_m} \simeq \frac{\frac{1}{2}f_a^2 m_a^2}{3m_{\text{pl}}^2 H_{\text{eq}}^2 (a_m/a_{\text{eq}})} \simeq \frac{f_a^2}{m_{\text{pl}}^2} \frac{1 + z_m}{1 + z_{\text{eq}}}, \quad (7.4.18a)$$

$$z_m \approx \frac{m^{1/2} z_{\text{eq}}^{1/4}}{(3H_0)^{1/2} \Omega_m^{1/4}} \approx z_{\text{eq}} \left(\frac{m}{6 \times 10^{-28} \text{eV}} \right)^{1/2}. \quad (7.4.18b)$$

これより,

$$m \sim 10^{-22} \text{eV} \Rightarrow k_J \sim 1 \text{Mpc}^{-1}, \quad (7.4.19)$$

$$\frac{f_a^2}{6m_{\text{pl}}^2} \sim 10^{-5} \Rightarrow 1 - S \sim 4 \times 10^{-3}. \quad (7.4.20)$$

7.4.4 数値計算

Reference

- Hlozek R, Grin D, Marsch DJE, Ferreira PG: arXiv:1410.2896

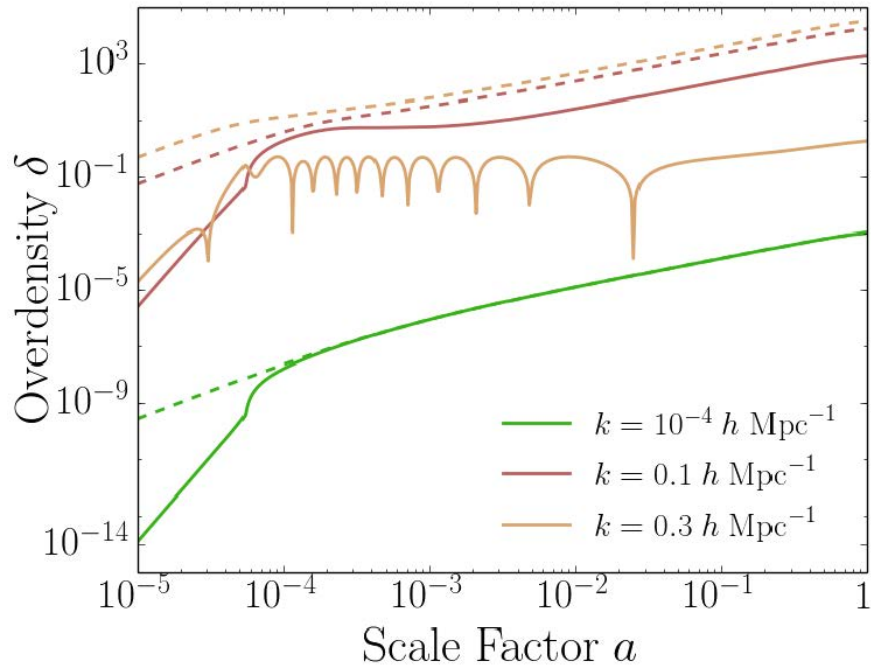


図 7.15: CDM+axion 系でのゆらぎの時間発展 (axion のゆらぎに対しては有効流体近似を用いている)

”A search for ultra-light axions using precision cosmological data”

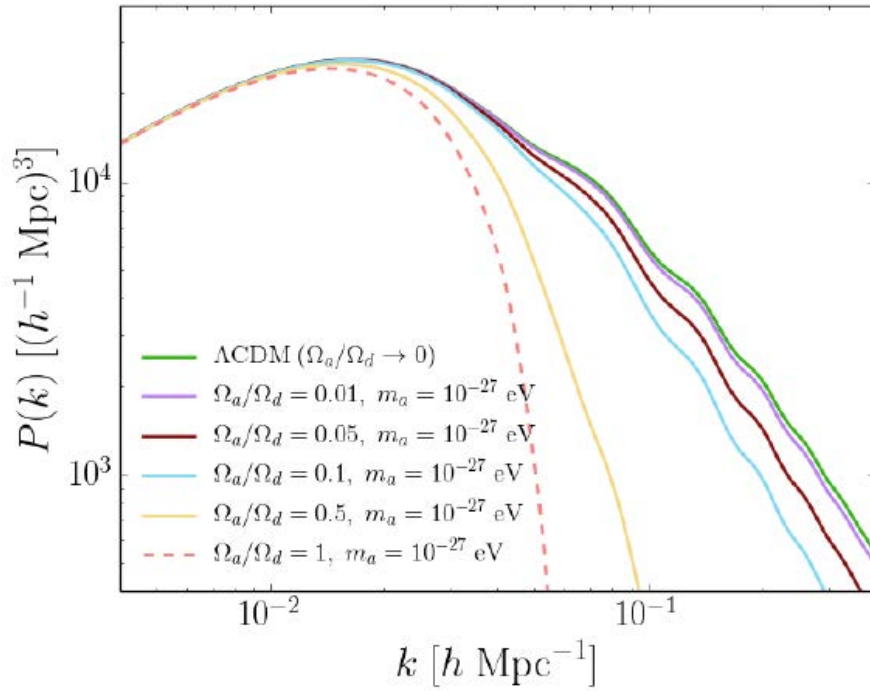


図 7.16: CDM+axion 系でのゆらぎのパワースペクトル

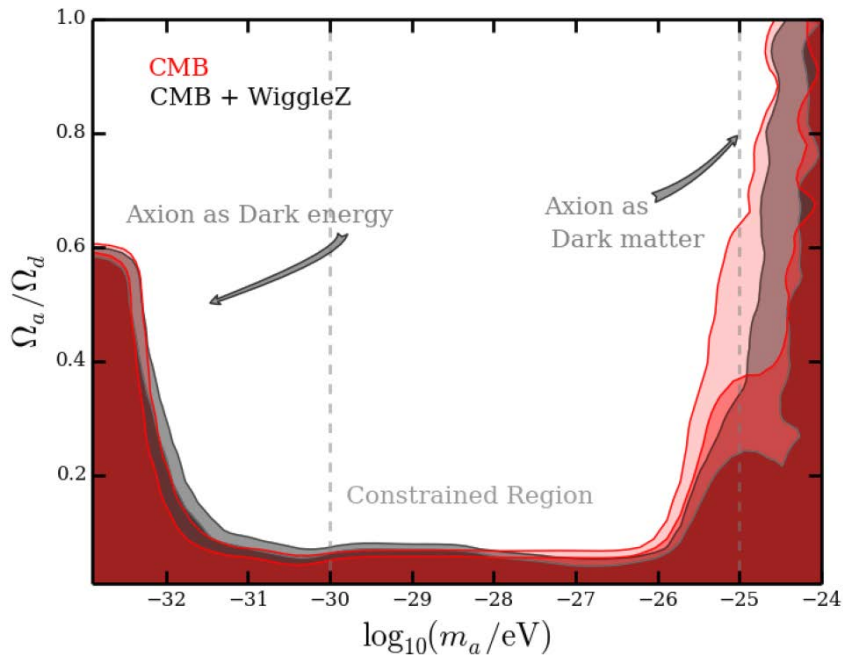


図 7.17: CDM+axion 系でのゆらぎのパワースペクトルと観測の比較に基づく $\Omega_a/\Omega_{\text{CDM}}$ に対する制限

§7.5

*Dark radiation とモジュライ問題

7.5.1 Moduli 問題

References

- 問題提起
 - G. Coughlan, W. Fischler, E.W. Kolb, S. Raby and G.G. Ross:
Phys. Lett. B 131 (1983) 59.
“Cosmological Problems for the Polonyi Potential”
 - A. Goncharov, A.D. Linde and M. Vysotsky:
Phys. Lett. B 147 (1984) 279.
“Cosmological problems for spontaneously broken supergravity”
 - J.R. Ellis, D.V. Nanopoulos and M. Quirós:
Phys. Lett. B 174 (1986) 176.
“On the Axion, Dilaton, Polonyi, Gravitino and Shadow Matter Problems in Supergravity and Superstring Models”
 - B. de Carlos, J. Casas, F. Quevedo and E. Roulet:
Phys. Lett. B 318 (1993) 447 [hep-ph/9308325]
“Model independent properties and cosmological implications of the dilaton and moduli sectors of 4 - D strings”
 - T. Banks, D.B. Kaplan and A.E. Nelson:
Phys. Rev. D 49 (1994) 779 [hep-ph/9308292].
“Cosmological implications of dynamical supersymmetry breaking”
- 解決法
 - L. Randall and S.D. Thomas:
Nucl. Phys. B 449 (1995) 229 [hep-ph/9407248]
“Solving the cosmological moduli problem with weak scale inflation”
 - A.D. Linde:
Phys. Rev. D 53 (1996) 4129[hep-th/9601083]
“Relaxing the cosmological moduli problem”

- D.H. Lyth and E.D. Stewart:
Phys. Rev. D 53 (1996) 1784 [hep-ph/9510204]
“Thermal inflation and the moduli problem”
- M. Dine, Y. Nir and Y. Shadmi:
Phys. Lett. B 438 (1998) 61 [hep-th/9806124].
“Enhanced symmetries and the ground state of string theory,”
- M. Kawasaki and F. Takahashi:
Phys. Lett. B 618 (2005) 1 [hep-ph/0410158]
“Late-time entropy production due to the decay of domain walls”
- K. Nakayama, F. Takahashi and T.T. Yanagida:
Phys. Rev. D 84 (2011) 123523 [arXiv:1109.2073]
“On the Adiabatic Solution to the Polonyi/Moduli Problem”
- Moduli-induced gravitino problem
 - M. Endo, K. Hamaguchi and F. Takahashi:
Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 211301 [hep-ph/0602061]
“Moduli-induced gravitino problem”
 - S. Nakamura and M. Yamaguchi:
Phys. Lett. B 638 (2006) 389 [hep-ph/0602081]
“Gravitino production from heavy moduli decay and cosmological moduli problem revived”
 - M. Dine, R. Kitano, A. Morisse and Y. Shirman:
Phys. Rev. D 73 (2006) 123518 [hep-ph/0604140]
“Moduli decays and gravitinos”
 - M. Endo, K. Hamaguchi and F. Takahashi:
Phys. Rev. D 74 (2006) 023531 [hep-ph/0605091]
“Moduli/Inflaton Mixing with Supersymmetry Breaking Field”
 - K.S. Jeong, M. Shimosuka and M. Yamaguchi
JHEP 09 (2012) 050 [arXiv:1112.5293]
“Light Higgsino in Heavy Gravitino Scenario with Successful Electroweak Symmetry Breaking”

Moduli 粒子の寿命 Moduli 粒子 X の質量を m_X , 崩壊粒子との結合係数を, $X \rightarrow 2$ bosons のとき $\mu(= [1/L])$, $X \rightarrow 2$ fermion のとき λ とするとき,

$$\Gamma \sim \begin{cases} \frac{\mu^2}{m_X} \\ \lambda^2 m_X \end{cases} . \quad (7.5.1)$$

一方, μ と λ は一般に, モジュライの場の質量スケールを M として,

$$\mu \sim \frac{m_X^2}{M}, \quad \lambda \sim g \frac{m_f}{M} \quad (7.5.2)$$

よって, 2 boson 崩壊が主要プロセスとなり,

$$\Gamma \sim \frac{m_X^2}{M^2} \Rightarrow \tau \sim \frac{M^2}{m_X^2} \sim 24\text{s} \left(\frac{M}{m_{\text{pl}}} \right)^2 \left(\frac{m_X}{10\text{TeV}} \right)^{-2}. \quad (7.5.3)$$

BBN の特徴的な時間

- BBN の開始

$$T_D \simeq 74\text{keV} = 8.6 \times 10^8\text{K} \Leftrightarrow t \simeq 240\text{s}, \quad (7.5.4)$$

- p/n 比が化学平衡からずれ出す時期

$$T_n \simeq 0.74\text{MeV} = 8.6 \times 10^9\text{K} \Leftrightarrow t \simeq 1.66\text{s} \quad (7.5.5)$$

と比較すると,

$$m \gtrsim 3\text{TeV} \quad (7.5.6)$$

の条件が満たされないと, BBN がモジュライの崩壊の影響を大きく受ける.

7.5.2 Dark radiation

- Moduli decay \Rightarrow dark radiation

[Higaki, Nakayama, Takahashi: arXiv:1304.7987].

- DR/axion \Rightarrow CMB スペクトル変形

[Higaki, Nakayama, Takahashi: arXiv: 1306.6518]

$$g_{a\gamma} B_0 < 10^{-15} \text{GeV}^{-1} \text{nG} \quad \text{for} \quad \Delta N_{\text{eff}} \sim 0.1. \quad (7.5.7)$$

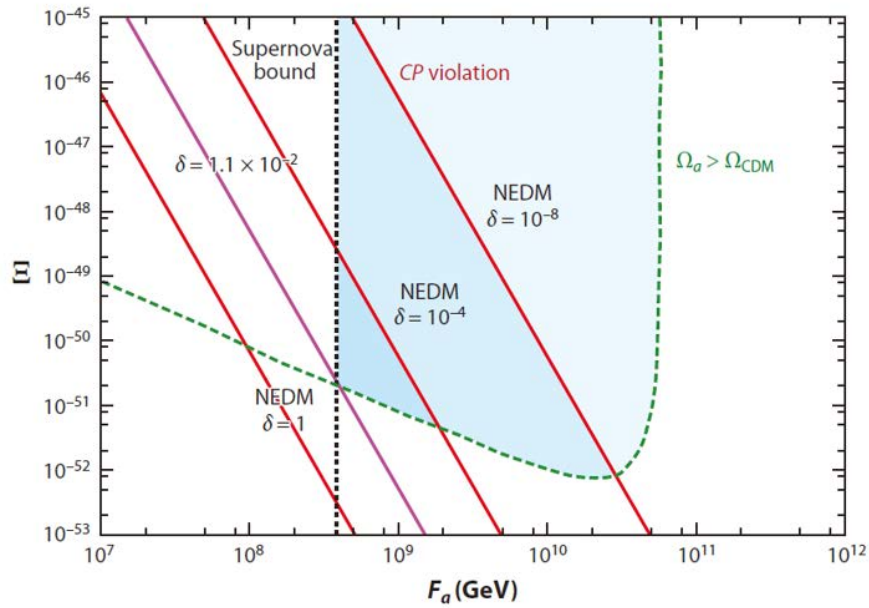


図 7.18: QCD axion の f_a とインフレーションスケールに対する等曲率ゆらぎからの制限

§7.6

*Isocurvature perturbations

References

- Ringwald A: arXiv:1407.0546
 ”Axions and Axion-Like Particles”
- Kawasaki M, Nakayama K: ARNPS 63, 69 (2013)
 ”Axions: Theory and Cosmological Role”

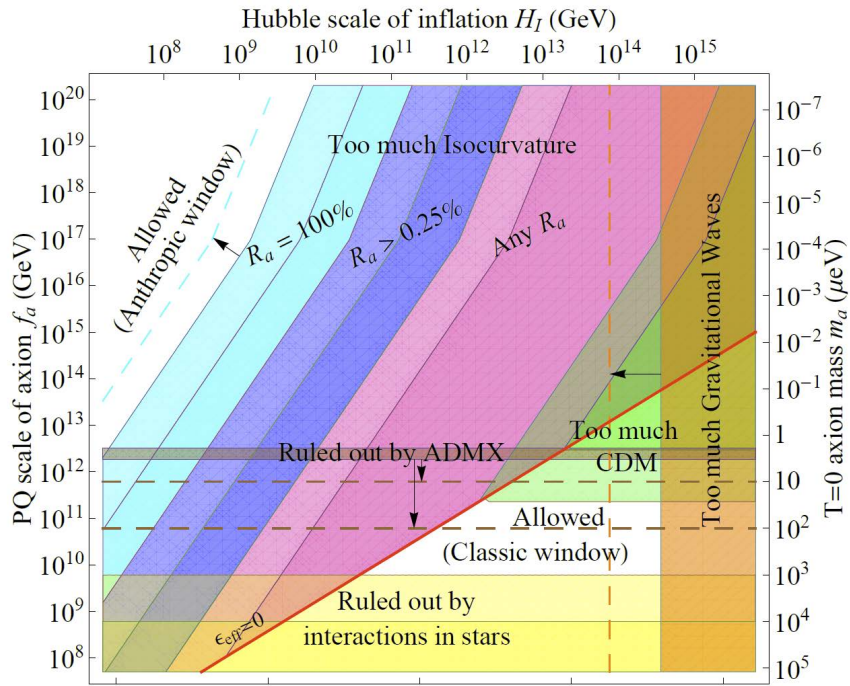


図 7.19: QCD axion の f_a とインフレーションスケールに対する等曲率ゆらぎからの制限

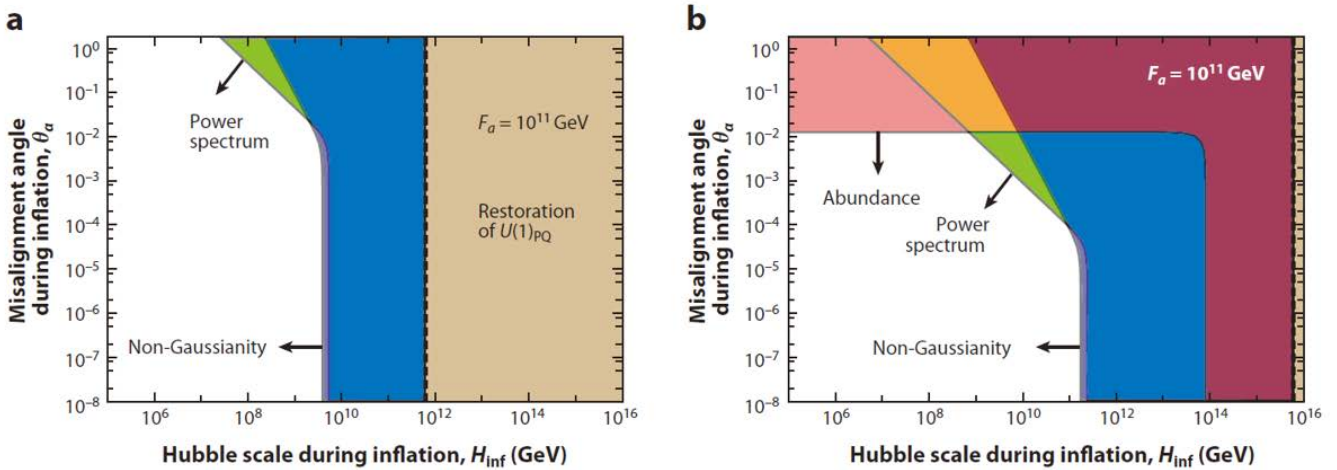


図 7.20: QCD axion の \mathbb{Z}_n 対称性を破る相互作用 $\delta V = -\Xi v^3(\phi e^{i\delta} + \text{h.c.})$ に対する制限

 §7.7

Gyro インフレーションモデル

References

- Peter Adshead, Emil Martinec, Mark Wyman: "Perturbations in Chromo-Natural Inflation", arXiv:1305.2930 [hep-th]
- Emil Martinec, Peter Adshead, Mark Wyman: "Chern-Simons EM-fation", JHEP 1302 (2013) 027 [arXiv:1206.2889 [hep-th]]
- Peter Adshead, Mark Wyman: "Gauge-fation trajectories in Chromo-Natural Inflation", Phys.Rev. D86 (2012) 043530 [arXiv:1203.2264 [hep-th]]
- Peter Adshead, Mark Wyman: "Chromo-Natural Inflation: Natural inflation on a steep potential with classical non-Abelian gauge fields", Phys.Rev.Lett. 108 (2012) 261302 [arXiv:1202.2366 [hep-th]]

7.7.1 Chromo-Natural Inflation

重力 + SU(2) ゲージ場 + アクシオンの系を考える。

作用積分

$$S = \int \frac{R}{2\kappa^2} *1 - \frac{1}{2} *d\phi \wedge d\phi - V(\phi) *1 - \frac{1}{2} \text{Tr}(*F \wedge F) - \frac{\lambda}{f_a} \phi \text{Tr}(F \wedge F). \quad (7.7.1)$$

Ansatz

$$\text{時空計量} : ds^2 = -dt^2 + a(t)^2 d\mathbf{x}^2, \quad (7.7.2)$$

$$\text{ゲージ場} : A^a = a(t)\psi(t)dx^a \quad (7.7.3)$$

これよりフラックスは

$$\begin{aligned} F^a &= dA^a + \frac{g}{2}\epsilon^{abc}A^b \wedge A^c \\ &= (a\dot{\psi}) \cdot dt \wedge dx^a + \frac{g}{2}(a\psi)^2 \epsilon_{abc} dx^b \wedge dx^c, \end{aligned} \quad (7.7.4)$$

$$F^a \wedge F_a = 3g(a\dot{\psi})^2 (a\psi) \cdot d^4x, \quad (7.7.5)$$

$$F^a \cdot F_a = -3(\dot{\psi} + H\psi)^2 + 3g^2\psi^4. \quad (7.7.6)$$

簡約 Lagrangian

$$L = a^3 \left[-\frac{3}{\kappa^2} \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 + \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi) + \frac{3}{2} (\dot{\psi} + H\psi)^2 - \frac{3}{2} g^2 \psi^4 - 3\lambda g \frac{\phi}{f_a} \psi^2 (\dot{\psi} + H\psi) \right] \quad (7.7.7)$$

運動方程式

- 宇宙膨張の方程式

$$H^2 = \frac{1}{3m_{\text{pl}}^2} (\rho_\phi + \rho_\psi); \quad (7.7.8)$$

$$\rho_\phi = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi), \quad (7.7.9)$$

$$\rho_\psi = \frac{3}{2} (\dot{\psi} + H\psi)^2 + \frac{3}{2} g^2 \psi^4, \quad (7.7.10)$$

$$\dot{H} = -\frac{1}{m_{\text{pl}}^2} \left\{ (\dot{\psi} + H\psi)^2 + g^2 \psi^4 + \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 \right\}. \quad (7.7.11)$$

- 場の方程式

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V'(\phi) = -\frac{3\lambda g}{f_a} \psi^2 (\dot{\psi} + H\psi), \quad (7.7.12a)$$

$$\ddot{\psi} + 3H\dot{\psi} + 2g^2 \psi^3 + (2H^2 + \dot{H})\psi = \frac{\lambda g}{f_a} \psi^2 \dot{\phi}. \quad (7.7.12b)$$

いま,

$$\psi_c = a\psi \quad (7.7.13)$$

とおくと,

$$\ddot{\psi}_c + H\dot{\psi}_c + \frac{2g^2}{a^2} \psi_c^3 = \frac{\lambda g}{a} \frac{\dot{\phi}}{f_a} \psi_c^2. \quad (7.7.14)$$

7.7.2 CS項がない場合 ($\lambda = 0$)

ψ_c の方程式 (7.7.14) より, $H\Delta t \gg 1$ で

$$\begin{aligned} \psi_c &\approx \psi_{c*} + E_{c*} \int_{\infty}^t \frac{dt}{a} \\ &= \psi_{c*} - \frac{E_{c*}}{H} e^{-Ht} + \mathcal{O}(g^2 e^{-2Ht}). \end{aligned} \quad (7.7.15)$$

よって.

$$\psi = \frac{\psi_c}{a} \approx \frac{\psi_{c*}}{a}, \quad (7.7.16a)$$

$$E = \dot{\psi} + H\psi = \frac{1}{a}\dot{\psi}_c \approx \frac{E_{c*}}{a^2}, \quad (7.7.16b)$$

$$\rho_\psi \approx \frac{3E_{c*}^2 + g^2\psi_{c*}^4}{2a^4}. \quad (7.7.16c)$$

したがって、フラックスの寄与は、通常の輻射と同じ振る舞いをし、すぐに無視できるようになる。

一方、アクシオン場 ϕ は閉じた標準の方程式

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V'(\phi) = 0, \quad (7.7.17)$$

$$V = \mu^4 \left(1 + \cos \frac{\phi}{f_a} \right). \quad (7.7.18)$$

に従うので、通常の公式が適用できる。slow roll パラメータは

$$\begin{aligned} \epsilon &:= \frac{m_{\text{pl}}^2 (V')^2}{2V^2} \approx -\frac{\dot{H}}{H^2} = \frac{\dot{\phi}^2}{2m_{\text{pl}}^2 H^2} \\ &\approx \frac{m_{\text{pl}}^2}{2f_a^2} \tan^2 \left(\frac{\phi}{2f_a} \right), \end{aligned} \quad (7.7.19a)$$

$$\begin{aligned} \eta &:= \frac{m_{\text{pl}}^2 V''}{V} \\ &\approx -\frac{m_{\text{pl}}^2}{2f_a^2} \left(1 - \tan^2 \left(\frac{\phi}{2f_a} \right) \right). \end{aligned} \quad (7.7.19b)$$

これより、 $\lambda = 0$ の場合、インフレーションが起きるには

$$f_a \gg m_{\text{pl}} \quad (7.7.20)$$

が要求される。

7.7.3 CS Influm

仮定

$$\sigma = \frac{g\lambda\psi^2}{f_a H} \gg 1, \quad \lambda^2\psi^2 \gg f_a^2 \quad (7.7.21)$$

Slow roll 方程式 $\dot{\phi}$ を消去すると、

$$H\dot{\psi} \approx -H^2\psi - \frac{V'(\phi)}{3\sigma} = -V'_{\text{eff}}(\psi) \quad (7.7.22)$$

ここで、axion potential

$$V = \mu^4 \left(1 + \cos \frac{\phi}{f_a} \right) \quad (7.7.23)$$

に対し

$$V_{\text{eff}}(\psi) = \frac{H^2}{2} \psi^2 + \frac{\mu^4 \sin(\phi/f_a) H}{2g\lambda} \frac{H}{\psi} \quad (7.7.24)$$

これより、 ψ の有効質量は $m_\psi \approx 3H$ となるので、 ψ は速やかに ($\Delta t H \sim 1$) で V_{eff} の極小点に緩和する：

$$\psi \approx \left[\frac{\mu^4}{3g\lambda H} \sin \left(\frac{\phi}{f_a} \right) \right]^{1/3}. \quad (7.7.25)$$

これを ϕ の方程式に代入して、

$$H\dot{\phi} \approx \frac{2}{\sigma} (H^2\psi + g^2\psi^3) \quad (7.7.26)$$

Inflation rate

$$N = \int H dt = \int \frac{H}{\dot{\phi}} d\phi \approx \int \frac{H^2 \sigma d\phi}{2(H^2\psi + g^2\psi^3)} \quad (7.7.27)$$

$$= \frac{1}{4} \lambda \int_{x_s}^{x_e} dx \frac{2k \sin^{1/3} x \cos^{4/3}(x/2)}{\cos^{8/3}(x/2) + k^2 \sin^{2/3} x} \lesssim 0.37\lambda, \quad (7.7.28)$$

ここで、

$$k = \frac{1}{2} \left(\frac{6g^2 m_{\text{pl}}^4}{\mu^4 \lambda} \right)^{1/3} \quad (7.7.29)$$

Inflation condition

$$\sigma^3 = \frac{1}{9\lambda^2} X^4 Y^3 \sin^2 \frac{\phi}{f_a} \gtrsim 1, \quad (7.7.30a)$$

$$\epsilon'_\psi = \frac{3\rho_\psi}{\rho_\phi} \approx \frac{3\sigma}{2X^2 Y} + \frac{2\sigma^2}{X^2 Y^2} \ll 1, \quad (7.7.30b)$$

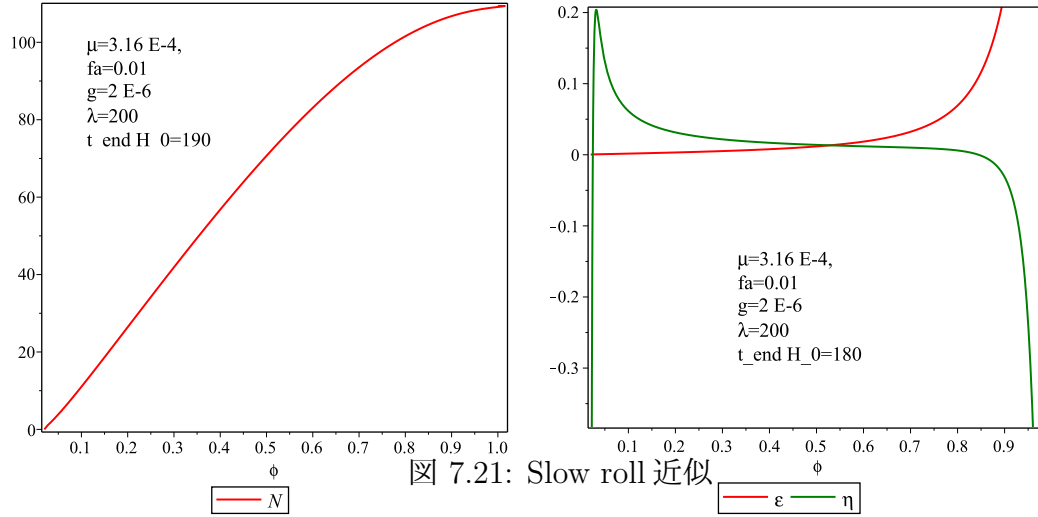
$$\epsilon_\phi := \frac{3\dot{\phi}^2}{2V} \approx \frac{\lambda}{X^2 Y^2} \frac{Y}{\sigma} \left(1 + \frac{\sigma}{Y} \right)^2 \ll 1. \quad (7.7.30c)$$

ここで、

$$X = \frac{g\mu^2}{H^2} \sim \frac{gm_{\text{pl}}^2}{\mu^2}, \quad Y = \frac{\lambda H}{gf_a} \sim \frac{\lambda\mu^2}{gf_a m_{\text{pl}}}. \quad (7.7.31)$$

これより、

$$\eta = -\frac{\dot{H}}{H^2} \simeq \epsilon_\phi + \epsilon'_\psi \ll 1. \quad (7.7.32)$$



7.7.4 数値解

変数を次の様に無次元化する：

$$x = \frac{\phi}{f_a}, \quad y = \frac{\psi}{f_a}, \quad h = \frac{H}{H_0}, \quad \tau = H_0 t. \quad (7.7.33)$$

ここで、

$$H_0^2 = \frac{V_0}{3m_{\text{pl}}^2} = \frac{2\mu^4}{3m_{\text{pl}}^2}. \quad (7.7.34)$$

これらを用いると運動方程式は、

$$\ddot{x} + 3h\dot{x} - \frac{2}{3\tilde{f}_a^2} \sin x = -3\tilde{\lambda}y^2(\dot{y} + hy), \quad (7.7.35a)$$

$$\ddot{y} + 3h\dot{y} + \left(2h^2 + \dot{h} + 2\tilde{g}^2y^2\right)y = \tilde{\lambda}y^2\dot{x}, \quad (7.7.35b)$$

$$\dot{h} = -\tilde{f}_a^2 \left\{ E^2 + \tilde{g}^2y^4 + \frac{1}{2}\dot{x}^2 \right\}, \quad (7.7.35c)$$

$$h^2 = \cos^2(x/2) + \tilde{f}_a^2 \left\{ \frac{1}{6}\dot{x}^2 + \frac{1}{2}E^2 + \frac{\tilde{g}^2}{2}y^4 \right\}, \quad (7.7.35d)$$

$$\dot{h} + 2h^2 = 1 + \cos(x) - \frac{1}{6}\tilde{f}_a^2\dot{x}^2, \quad (7.7.35e)$$

$$E = \dot{y} + hy. \quad (7.7.35f)$$

ここで、

$$\tilde{f}_a = \frac{f_a}{m_{\text{pl}}}, \quad \tilde{g} = \frac{gf_a}{H_0}, \quad \tilde{\lambda} = \tilde{g}\lambda. \quad (7.7.36)$$

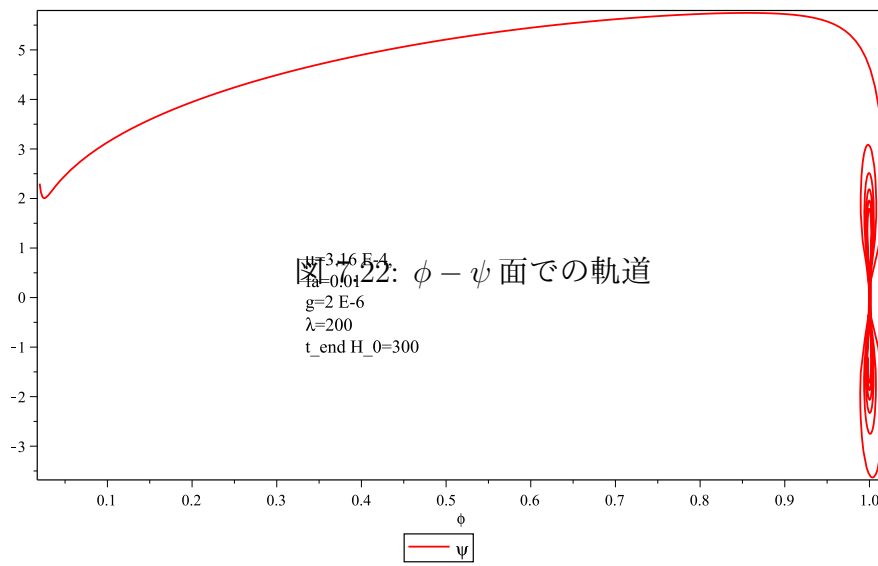


図7.22: $\phi - \psi$ 面での軌道
 $\mu=3.16 \text{ E-4}$
 $\text{fa}=0.01$
 $g=2 \text{ E-6}$
 $\lambda=200$
 $t_{\text{end H}_0}=300$

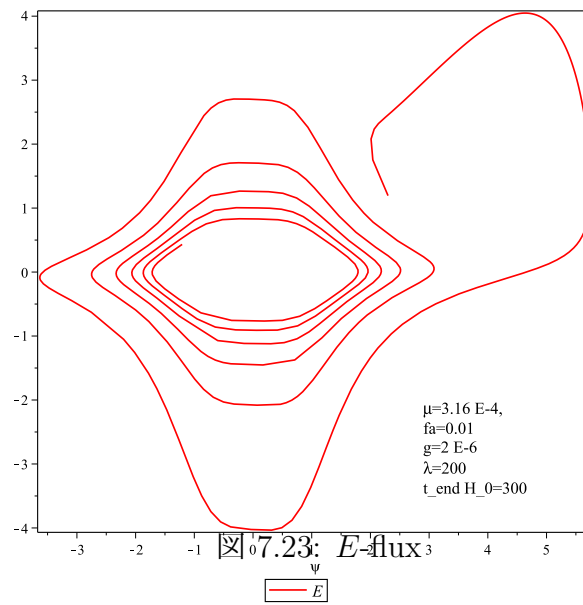


図7.23: E -flux
 $\mu=3.16 \text{ E-4}$
 $\text{fa}=0.01$
 $g=2 \text{ E-6}$
 $\lambda=200$
 $t_{\text{end H}_0}=300$

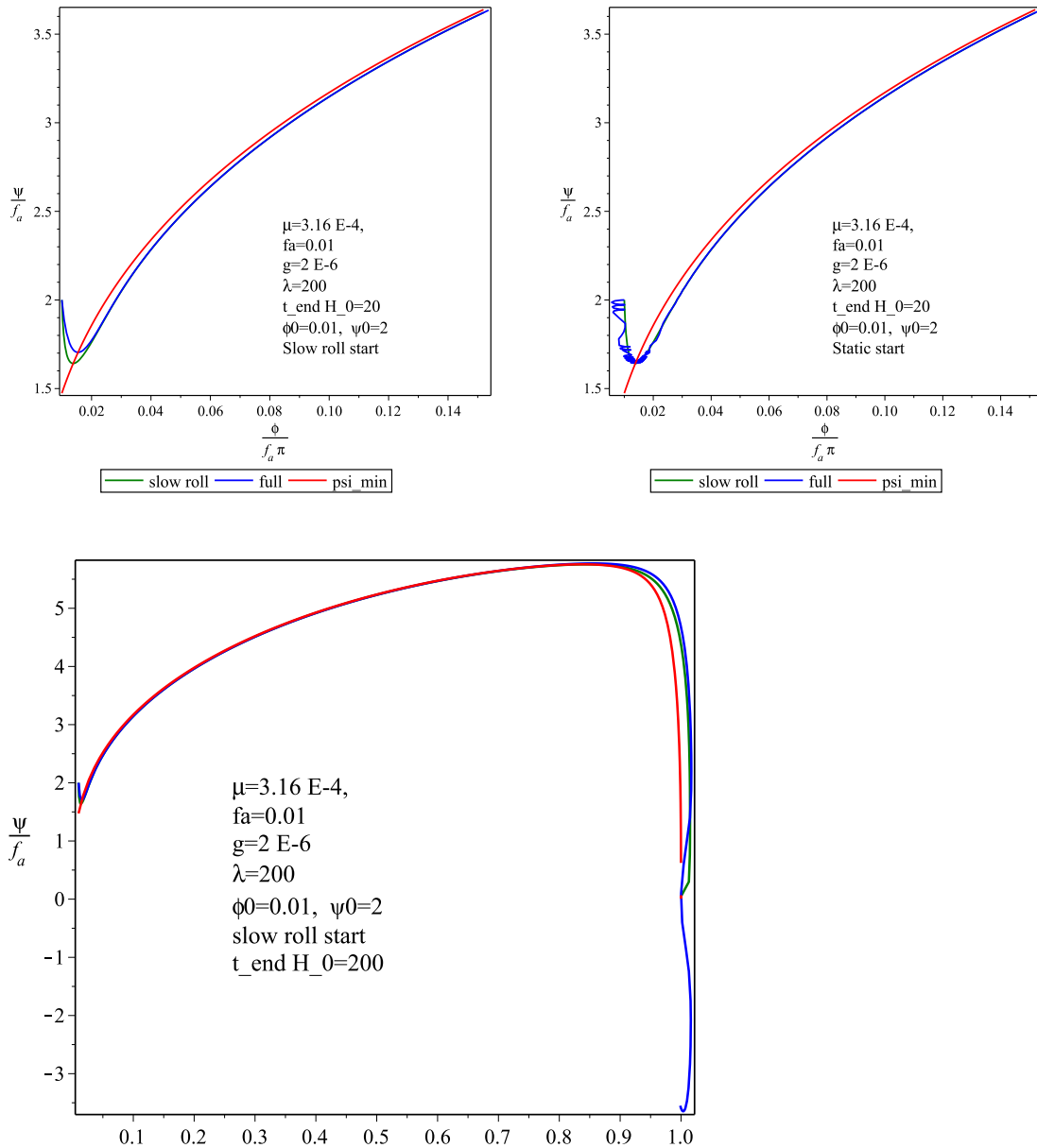


図 7.24: $\psi = \psi_{\min}(\phi)$ より大きい ψ_0 を初期値とする場合のフルの数値解と Slow roll 解の比較 ($\phi_0/(\pi f_a) = 0.01, \psi_0/f_a = 2$). 上左は Slow roll 近似と同じ初期速度, 右は $\phi_0 = \psi = 0$ とおいた場合. 下は, slow roll スタートでの長時間での振る舞い

例えば,

$$\begin{aligned}\mu &= 3.16 \times 10^{-4} m_{\text{pl}}, \quad f_a = 0.01 m_{\text{pl}}, \quad g = 2 \times 10^{-6}, \quad \lambda = 200 \\ \Rightarrow \tilde{f}_a &= 0.01, \quad \tilde{g} = 0.24, \quad \tilde{\lambda} = 50.\end{aligned}\tag{7.7.37}$$

に対して, slow roll 近似では $N = 100$ 程度のインフレーションが起きる. Slow roll 近似も $\phi = 0$ 近傍および $\phi = \pi$ 近傍を除いてよく成り立つ.

初期値が $\psi = \psi_{\min}(\phi)$ 曲線からずれた場合, 最初軌道はこの曲線からずれるが, ある程度時間がたつとこの曲線に乗るようになる. 明らかに, この曲線は attractor となっている. ただし, ψ の初期値が曲線より下で, 速度が slow roll 近似からずれると, この曲線に到達するのにかなり時間がかかる.

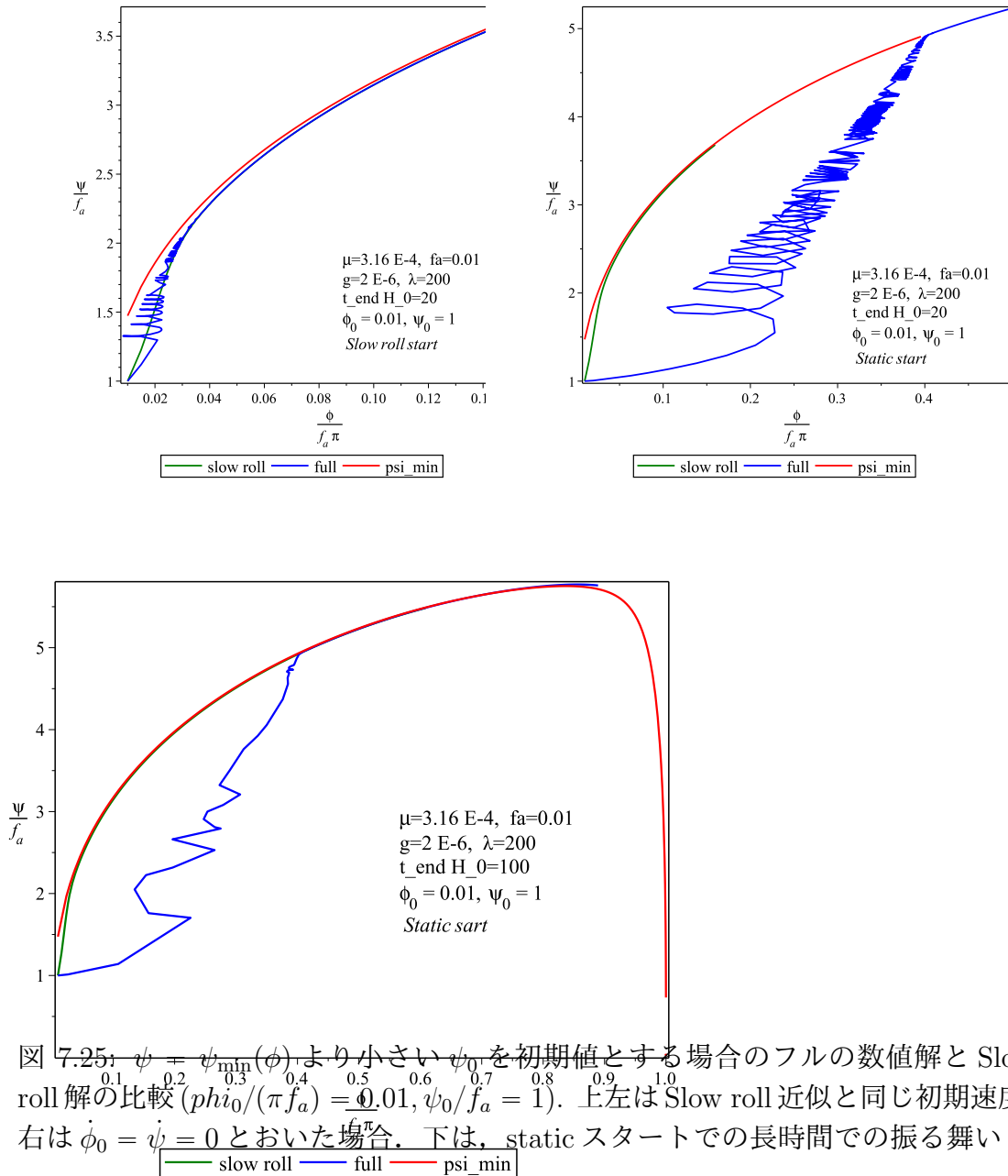


図 7.25: $\psi = \psi_{\min}(\phi)$ より小さい ψ_0 を初期値とする場合のフルの数値解と Slow roll 解の比較 ($\phi_0/(\pi f_a) = 0.01, \psi_0/f_a = 1$). 上左は Slow roll 近似と同じ初期速度, 右は $\dot{\phi}_0 = \dot{\psi} = 0$ とおいた場合. 下は, static スタートでの長時間での振る舞い

7.7.5 一般論

Single axion model

場の系 $\Phi = (\phi, X)$ ($X = (X_m)$) が次の Lagrangian をもつとする :

$$L = L_0 + L_{\text{CS}}; \quad (7.7.38)$$

$$L_0 = a^3 \left[-3m_{\text{pl}}^2 \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 + \frac{1}{2}(\dot{\phi})^2 + \frac{1}{2}(\dot{X})^2 - V(\Phi) \right], \quad (7.7.39)$$

$$L_{\text{CS}} = \lambda a^3 \dot{\phi} U(X). \quad (7.7.40)$$

運動方程式は

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \lambda\alpha \cdot \dot{X} = F_\phi, \quad (7.7.41a)$$

$$\ddot{X} + 3H\dot{X} - \lambda\alpha\dot{\phi} = F_X. \quad (7.7.41b)$$

ここで、

$$\alpha = dU(X), \quad (7.7.42a)$$

$$F_\phi = -\partial_\phi V - 3H\lambda U(X), \quad (7.7.42b)$$

$$F_X = -\partial_X V. \quad (7.7.42c)$$

Slow roll 近似では

$$3H\dot{\phi} + \lambda\alpha \cdot \dot{X} = F_\phi, \quad (7.7.43a)$$

$$3H\dot{X} - \lambda\alpha\dot{\phi} = F_X/ \quad (7.7.43b)$$

これらより、 $\dot{\phi}$ を消去すると、

$$\left(3H + \frac{\lambda^2 \alpha^2}{3H} P_\alpha \right) \dot{X} = F_X + \frac{\lambda}{3H} \alpha F_\phi. \quad (7.7.44)$$

ここで、

$$P_\alpha = (\alpha \cdot \alpha)^{-1} \alpha_\circ T_\alpha \quad (7.7.45)$$

この方程式を \dot{X} について解くと、

$$\dot{X} = \frac{1}{3H} (1 - P_\alpha) F_X + \frac{1}{9H^2 + \lambda^2 \alpha^2} (\lambda \alpha F_\phi + 3H P_\alpha F_X) \quad (7.7.46)$$

これより、 α に垂直な方向の X の有効質量は元の質量 m_X , α 方向の有効質量は $3H$ となる。したがって、 $m_X \gtrsim H$ なら、 X は急速に \dot{X} の位置に緩和する :

$$(1 - P_\alpha) F_X = 0, \quad F_\phi \approx 0. \quad (7.7.47)$$

これにより, X が ϕ の関数 $X = X(\phi)$ として定まる. すなわち, Φ 空間での軌道が定まる. ここで, $F_\phi = 0$ が $\partial_\phi V = 0$ を意味しない点が重要である.

最後に, $\dot{\phi}$ の式は

$$\begin{aligned}\dot{\phi} &\simeq -\frac{\lambda}{3H}\alpha \cdot \dot{X} + \frac{1}{3H}F_\phi \\ &\simeq \frac{3H}{9H^2 + \lambda^2\alpha^2}F_\phi - \frac{\lambda}{9H^2 + \lambda^2\alpha^2}\alpha \cdot F_X \\ &\approx \frac{1}{\lambda\alpha^2}\alpha \cdot \partial_X V\end{aligned}\quad (7.7.48)$$

したがって, インフラトン ϕ の振る舞いはほとんど $V(\phi)$ と無関係となる!

Multiple axion model

場の系 $\Phi = (\phi, X)$ ($\phi = (\phi_i), X = (X_m), i = 1, \dots, n, m = 1, \dots, p$) が次の Lagrangian をもつとする:

$$L = L_0 + L_{CS}; \quad (7.7.49)$$

$$L_0 = a^3 \left[-3m_{\text{pl}}^2 \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 + \frac{1}{2}(\dot{\phi} + Hk\phi)^2 + \frac{1}{2}(\dot{X} + HlX)^2 - V(\Phi) \right] \quad (7.7.50)$$

$$L_{CS} = \lambda a^3 \sum_i (\dot{\phi} + Hk\phi)^i U_i(\Phi). \quad (7.7.51)$$

運動方程式は

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} - \lambda W\dot{\phi} + \lambda A\dot{X} = F_\phi, \quad (7.7.52a)$$

$$\ddot{X} + 3H\dot{X} - \lambda^T A\dot{\phi} = F_X. \quad (7.7.52b)$$

ここで,

$$W_{ij} = \partial_{\phi_i} U_j - \partial_{\phi_j} U_i, \quad (7.7.53a)$$

$$A = \partial_X U = (\partial U^i / \partial X_m), \quad (7.7.53b)$$

$$F_\phi = -\partial_\phi V - k(\dot{H} + 2H^2)\phi - \lambda H(3U - \partial_\phi \tilde{U}), \quad (7.7.53c)$$

$$F_X = -\partial_X V - l(\dot{H} + 2H^2)X + \lambda H \partial_X \tilde{U}, \quad (7.7.53d)$$

$$\tilde{U} = \sum_i k_i \phi_i U_i. \quad (7.7.53e)$$

Slow roll 近似で

$$(3H - \lambda W)\dot{\phi} + \lambda A\dot{X} = F_\phi, \quad (7.7.54a)$$

$$3H\dot{X} - \lambda^T A\dot{\phi} = F_X. \quad (7.7.54b)$$

最初の式より,

$$\dot{\phi} = -\frac{\lambda}{3H}BA\dot{X} + \frac{1}{3H}BF_\phi, \quad (7.7.55)$$

$$B = \left(1 - \frac{\lambda}{3H}W\right)^{-1}. \quad (7.7.56)$$

これを \dot{X} の式に代入し, \dot{X} について解くと

$$\begin{aligned} 3H\dot{X} &= \left(1 + \frac{\lambda^2}{9H^2}T_{ABA}\right)^{-1} \left(F_X + \frac{\lambda}{3H}T_{ABF_\phi}\right) \\ &= (1 - P_A)F_X \\ &\quad + P_A \left(1 + \frac{\lambda^2}{9H^2}T_{ABA}\right)^{-1} \left(P_AF_X + \frac{\lambda}{3H}T_{ABF_\phi}\right) \end{aligned} \quad (7.7.57)$$

ここで, P_A は \dot{X} の空間で A^i_m の張る線形部分空間への射影演算子で, 適当な n 次の正方行列 p_A を用いて

$$P_A = {}^TAp_AA \quad (7.7.58)$$

と表される. 特に,

$$(1 - P_A)\partial_X U = 0 \Rightarrow (1 - P_A)\partial_X \tilde{U} = 0. \quad (7.7.59)$$

一般に,

$$\begin{aligned} A \left(1 + \frac{\lambda^2}{9H^2}T_{ABA}\right)^{-1} {}^TA &= A {}^TA \left(1 + \frac{\lambda^2}{9H^2}BA {}^TA\right)^{-1} \\ &= A {}^TA \left(A {}^TA + \frac{9H^2}{\lambda^2}B^{-1}\right)^{-1} \frac{9H^2}{\lambda^2}B^{-1} \end{aligned} \quad (7.7.60)$$

これより, λ が大きい極限で,

$$P_A \left(1 + \frac{\lambda^2}{9H^2}T_{ABA}\right)^{-1} \left(P_AF_X + \frac{\lambda}{3H}T_{ABF_\phi}\right) \approx 3H^2 {}^TAp_A(3U - \partial_\phi \tilde{U}) \quad (7.7.61)$$

よって, X の有効質量は, $(1 - P_A)$ の方向で m_X , P_A の方向で $O(H)$.

X 場が $\dot{X} = 0$ に緩和するとすると,

$$(1 - P_A)F_X = 0, \quad P_AF_X + \frac{\lambda}{3H}T_{ABF_\phi} = 0. \quad (7.7.62)$$

また, $\dot{\phi}$ の式は,

$$3H\dot{\phi} \simeq \left(1 - \frac{\lambda}{3H}W + \frac{\lambda^2}{3H^2}A {}^TA\right)^{-1} \left(-\frac{\lambda}{3H}AF_X + F_\phi\right) \quad (7.7.63)$$

よって, $\lambda \gg 3H$ のとき,

$$\text{rank}(A^T A) = n \ \& \ \partial_X \tilde{U} = 0 \ \Rightarrow \ 3H\dot{\phi} \approx -\frac{3H}{\lambda}(A^T A)^{-1} A F_X. \quad (7.7.64)$$

一方, $\partial_X \tilde{U} \neq 0$ の時には, $\lambda \gg 3H$ で

$$\dot{\phi} \approx -H(A^T A)^{-1} A \partial_X \tilde{U} \quad (7.7.65)$$

となり, 一般に slow roll インフレーションは実現されない.

8

Black holes

§8.1

基本事項

8.1.1 ブラックホールの定義

\mathcal{M} を漸近的に単純な時空, \mathcal{I} をその共形無限遠とする [12]. 時空は Cauchy 面 Σ から漸近的に予言可能, すなわち $\mathcal{I} \subset \overline{D(\Sigma)}$ in $\hat{\mathcal{M}}$ が成り立つとする. これらの条件のもと, ホライズンを無限遠 \mathcal{I} から観測可能な領域 (DOC)

$$\text{DOC} = J^-(\mathcal{I}, \mathcal{M}) \cap J^+(\mathcal{I}, \mathcal{M}). \quad (8.1.1)$$

の境界として定義する :

$$H^+ = \partial(J^-(\mathcal{I})) \cap J^+(\mathcal{I}). \quad (8.1.2)$$

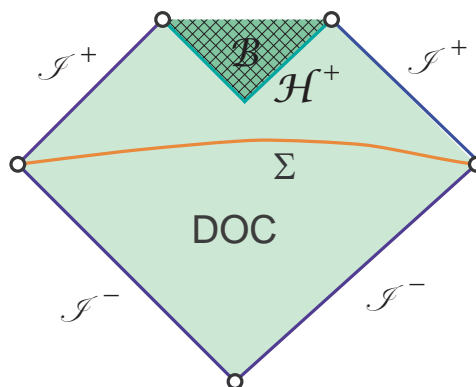


図 8.1: Black hole spacetime

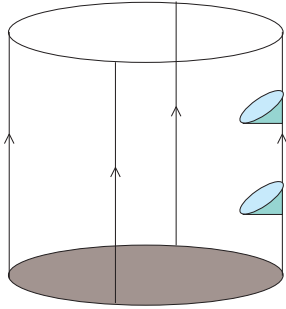


図 8.2: Killing horizon

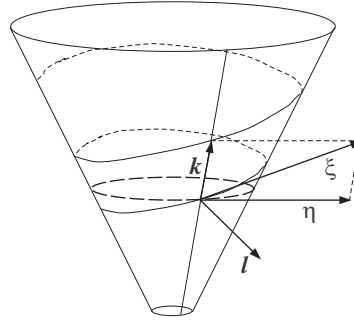


図 8.3: Horizon of a rotating black hole

さらに、ブラックホール領域を無限遠から観測できない領域 \mathcal{B}

$$\mathcal{B} = \overline{\mathcal{M} - J^-(\mathcal{I})}, \tag{8.1.3}$$

とする

8.1.2 Killing ホライズン

定常時空

時空 \mathcal{M} は、ある領域で時間的となる Killing ベクトルをもつとき、定常であるという。定常時空の計量は

$$ds^2 = -e^{2U(x)}(dt + A(x))^2 + g_{ij}(x)dx^i dx^j, \tag{8.1.4}$$

この座標系では、Killing ベクトルは

$$\xi_* = -e^{2U}(dt + A(x)). \tag{8.1.5}$$

Killing ベクトルの回転を

$$*(\xi_* \wedge d\xi_*) = -e^{3U} *_n dA. \tag{8.1.6}$$

により定義する。

時空 \mathcal{M} は、軌道がすべて閉曲線である領域で空間的となる Killing ベクトル η をもつとき、軸対称という。剛性定理より、定常で解析的な時空は常に軸対称となる。

Killing ホライズン

定常時空の光的超曲面 \mathcal{H} は、 \mathcal{H} 上でその光的測地線に平行となる Killing ベクトルが存在するとき、Killing ホライズンという。漸近的に単純で静的な時空にお

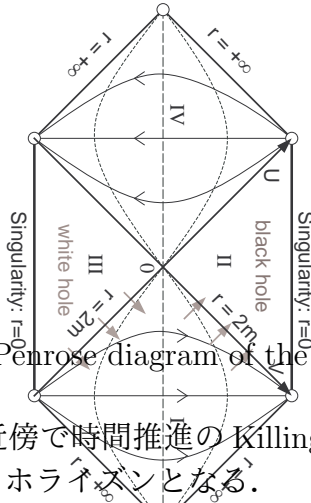


図 8.4: Penrose diagram of the Schwarzschild black hole

いて、無限遠 \mathcal{I} の近傍で時間推進の Killing ベクトルが時間的なら、この時空のホライズンは Killing ホライズンとなる。

T 定常時空のブラックホールは、時間推進の Killing ベクトルがホライズン上で空間的となるとき、回転的という。定常軸対称時空が Killing horizon \mathcal{H} を持つし、 ξ と η をその時間推進および回転の Killing ベクトルとする。このとき、 \mathcal{H} の光的接ベクトル k は

$$k = \xi + \Omega_h \eta. \tag{8.1.7}$$

と表される。 Ω_h はブラックホールの回転角速度と呼ばれる。さらに、

$$\nabla_k k = \kappa k \Leftrightarrow \nabla k^2 = -2\kappa k \tag{8.1.8}$$

係数 κ はブラックホールの表面重力加速度と呼ばれる。

8.1.3 例

静的ブラックホール

定常ブラックホール時空は、その時間推進の Killing ベクトル ξ の回転がゼロの時、静的という。静的時空 (\mathcal{M}, g) の計量は次のように書かれる。

$$ds^2 = -e^{2U(x)} dt^2 + g_{ij}(x) dx^i dx^j. \tag{8.1.9}$$

最も重量な例は、Schwarzschild 時空である：

$$ds^2 = -f(r) dt^2 + \frac{dr^2}{f(r)} + r^2 d\sigma_n^2; \quad f(r) = 1 - \left(\frac{r_0}{r}\right)^{n-1} - \lambda r^2 \tag{8.1.10}$$

ここで、 $d\sigma_n^2$ は n 次元単位球 S^n の計量、 λ は宇宙定数で $\lambda = \frac{2\Lambda}{n(n+1)}$ と表される。 $\lambda = 0$ で漸近的に平坦なとき、この解は唯一の正則な解である（静的ブラックホールの一意性定理）。

この球対称時空では、ホライズンは Killing ホライズンで、その位置 $r = r_h$ は $f(r_h) = 0$ の解となる。ホライズンは、 $\mathbb{R} \times S^n$ と同相である。

Kerr ブラックホール

4次元の漸近的平坦な真空のカテゴリリーでは、回転している定常な正則ブラックホール解は一意的で、それは Kerr 解で与えられる。

$$ds^2 = -\frac{\Delta\rho^2}{\Gamma}dt^2 + \frac{\Gamma\sin^2\theta}{\rho^2}(d\phi - \Omega dt)^2 + \rho^2\left(\frac{dr^2}{\Delta} + d\theta^2\right), \quad (8.1.11)$$

ここで

$$\Delta = r^2 - 2Mr + a^2, \quad \rho^2 = r^2 + a^2 \cos^2\theta, \quad \Gamma = (r^2 + a^2)^2 - a^2\Delta \sin^2\theta, \quad \Omega = \frac{2aMr}{\Gamma}. \quad (8.1.12)$$

この時空のホライズンも Killing ホライズンで、その場所は $\Delta(r) = 0$ の解となり、 $r = r_h = r_+ = M + (M^2 - a^2)^{1/2}$ で与えられる。 $\Delta(r) = 0$ は、 ∂_t と ∂_ϕ で張られる面が光的となる条件と一致する。ホライズンは位相的には $\mathbb{R} \times S^2$ 。この時空の Killing ベクトル ∂_t の回転は

$$\omega = d\left(\frac{2aM \cos\theta}{\rho^2}\right) \neq 0, \quad (8.1.13)$$

となるので、Kerr ブラックホールは回転的である。したがって、この時間推進 Killing はホライズン上で空間的となり (Fig.8.3), $g_{tt} > 0$ となるエルゴ領域がホライズン近傍に現れる: $\rho^2 g_{tt} = a^2 \sin^2\theta - \Delta$ 。このエルゴ領域の存在は、回転ブラックホールの超反射不安定にとって本質的である。ブラックホールの回転角速度 Ω_h は、 $\partial_t + \Omega_h \partial_\phi$ が光的ベクトルとなる条件より

$$\Omega_h = \Omega(r_h) = \frac{2aMr_h}{(r_h^2 + a^2)^2} = \frac{a}{2Mr_h} = \frac{a}{r_h^2 + a^2}. \quad (8.1.14)$$

と決まる。

§8.2

束縛状態と散乱

8.2.1 ブラックホール近傍での粒子の運動

Schwarzschild black hole

ブラックホールの周りでの粒子の運動は、粒子の質量がゼロか有限かで異なる。例えば、Schwarzschild BH の周りでの運動方程式は次の2式に帰着される。

$$E = -u \cdot \xi = -u_t = f(r)\dot{t}, \quad L = u \cdot \eta = u_\phi = r^2\dot{\phi}, \quad (8.2.1a)$$

$$-\epsilon = -f\dot{t}^2 + \frac{\dot{r}^2}{f} + r^2\dot{\phi}^2, \quad (8.2.1b)$$

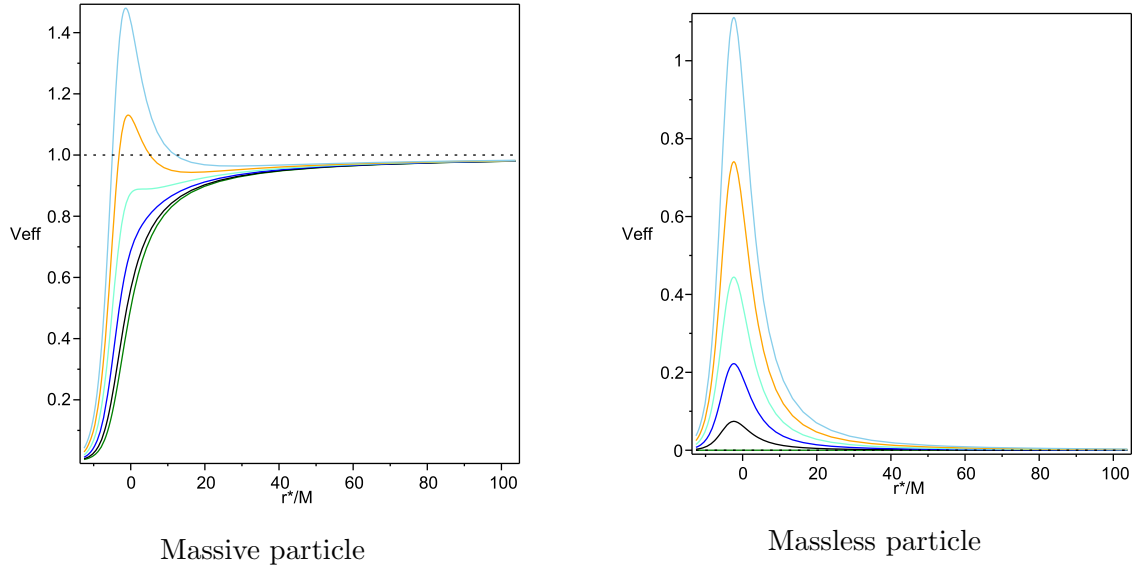


図 8.5: The effective potential for a particle with $L = 0, \dots, 5$ around the 4D Schwarzschild BH

ここで、有質量の場合 $\epsilon = 1$ 、ゼロ質量の場合 $\epsilon = 0$ である。運動の振る舞いは、有効ポテンシャル $V(r)$ で決ま (図 8.5):

$$\dot{r}^2 + V(r) = E^2; \quad V(r) = \left(\epsilon + \frac{L^2}{r^2} \right) f(r). \quad (8.2.2)$$

これより、有質量の場合とことなり、ゼロ質量粒子は安定な束縛軌道がないことがわかる。5次元以上では、有質量粒子も安定な束縛軌道を持たなくなる。

Kerr ブラックホール

赤道面上の軌道に限定すると、

$$E = -g_{tt}\dot{t} - g_{t\phi}\dot{\phi}, \quad L = g_{\phi t}\dot{t} + g_{\phi\phi}\dot{\phi}, \quad (8.2.3a)$$

$$-\epsilon = g_{tt}\dot{t}^2 + 2g_{t\phi}\dot{t}\dot{\phi} + g_{\phi\phi}\dot{\phi}^2 + \frac{r^2}{\Delta}\dot{r}^2, \quad (8.2.3b)$$

対応する有効ポテンシャルは

$$\dot{r}^2 + V(r) = E^2; \quad V(r) = \frac{\epsilon\Delta}{r^2} - \frac{a^2E^2 - L^2}{r^2} - \frac{2M(aE - L)^2}{r^3}, \quad (8.2.4)$$

ここで、図 8.6 に示したように、粒子の運動は、回転がブラックホールの回転と同じ向きか、反対向きかで大きく異なる。特に、同方向に回転する方が遠心力が弱くなる。

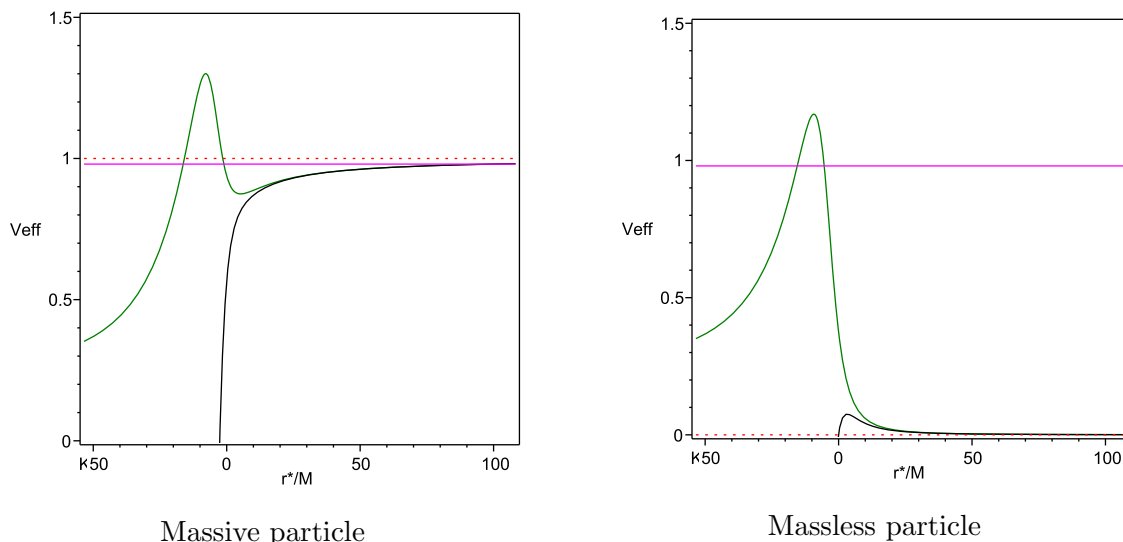


図 8.6: The effective potential for particles with $L = 3$ (corotating) and $L = -3$ (counter-rotating) around the Kerr BH with $a = 0.999$. r^* is the tortoise coordinate defined by $dr^* = (r^2 + a^2)dr/\Delta$.

8.2.2 Kerr BH でのゼロ質量場

フラックス保存

波動性のため、BH 近傍での場の振る舞いは粒子と大きく異なる。例えば、軸対称定常 BH での Klein-Gordon 場を考える：

$$D^\mu D_\mu \phi = 0; \quad D_\mu = \partial_\mu - iqA_\mu, \quad (8.2.5)$$

ここで、 A_μ は電磁ポテンシャル、 q は粒子の電荷である。この方程式より、Klein-Gordon 内積

$$N(\phi_1, \phi_2) = -i \int_\Sigma (\bar{\phi}_1 D^\mu \phi_2 - (\bar{D}^\mu \bar{\phi}_1) \phi_2) d\Sigma_\mu \quad (8.2.6)$$

が DOC の Cauchy 面 Σ の取り方によらないことが示される。これより、図 8.7 の散乱問題において、無限遠からの入射フラックス $I_{\mathcal{I}^-}$ 、ブラックホールに落ち込むフラックス $I_{\mathcal{H}^+}$ および無限遠に放出されるフラックス $I_{\mathcal{I}^+}$ の間に次の関係が成り立つ：

$$I_{\mathcal{I}^-} = I_{\mathcal{I}^+} + I_{\mathcal{H}^+} \quad (8.2.7)$$

増幅反射

スカラー場は無限遠で

$$\phi \approx \int d\omega \sum_m \frac{1}{r} (A^- e^{-i\omega u_-} + A^+ e^{+i\omega u_+}) e^{im\varphi}; \quad u_\pm = t \mp \int dr/f, \quad (8.2.8)$$

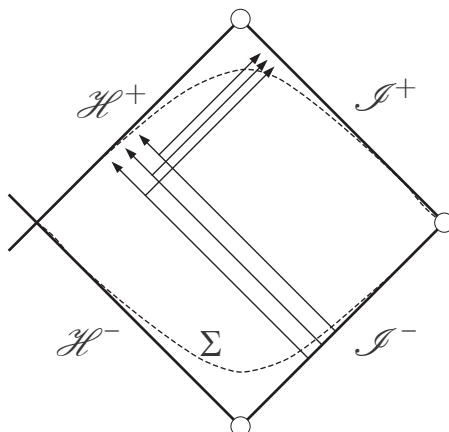


図 8.7: Scattering of an incidental wave by an AF black hole

と振る舞うので、無限遠でもフラックスは

$$I_{\mathcal{I}^\pm} = i \int du_\pm \int_{S^2} d\Omega_2 \lim_{r \rightarrow \infty} r^2 (\vec{\phi} \vec{\partial}_{u_\pm} \phi) = \sum_m \int d\omega \omega \langle |A_{\omega,m}^\pm|^2 \rangle_{S^2}, \quad (8.2.9)$$

ここで、 $\langle Q \rangle_{S^2}$ は S^2 での Q の平均.

次に、ホライズン \mathcal{H}^+ 近傍では

$$\begin{aligned} \phi &= \phi(r, \theta) e^{-i\omega t + im\varphi} = \phi(r, \theta) e^{-i\omega_* t + im\tilde{\varphi}} \\ &= \phi(r, \theta) e^{i\omega_* r^*} e^{-i\omega_* v_+ + im\tilde{\varphi}} \approx C(\theta) e^{-i\omega_* v_+ + im\tilde{\varphi}}, \end{aligned} \quad (8.2.10)$$

ここで、 $\omega_* := \omega - m\Omega_h$, $\tilde{\varphi} = \varphi - \Omega_h t$, $v_+ = t + \int dr (r^2 + a^2)/\Delta$.

v_+ と $\tilde{\varphi}$ は \mathcal{H}^+ 近傍で正則な座標なので、 C は θ の有界関数でないといけない。したがって、 \mathcal{H}^+ を横切るフラックスは

$$\begin{aligned} I_{\mathcal{H}^+} &= i \int dv_+ \int_{S^2} d^{D-2}\sigma \left(\vec{\phi} (\vec{\partial}_{v_+} + 2iq\Phi) \phi \right)_{\mathcal{H}^+} \\ &= \sum_m \int d\omega (\omega_* - q\Phi_h) (r_h^2 + a^2) \langle |C_{\omega,m}|^2 \rangle_{S^2}. \end{aligned} \quad (8.2.11)$$

これらを (8.2.7) に代入して

$$\omega \langle |A_{\omega,m}^-|^2 \rangle = \omega \langle |A_{\omega,m}^+|^2 \rangle + (\omega - m\Omega_h - q\Phi_h) (r_h^2 + a^2) \langle |C_{\omega,m}|^2 \rangle. \quad (8.2.12)$$

透過率 T と反射率 R を

$$T := I_{\mathcal{H}^+}/I_{\mathcal{I}^-}, \quad R := I_{\mathcal{I}^+}/I_{\mathcal{I}^-}, \quad (8.2.13)$$

により定義すると、 $R + T = 1$ なので、次の条件が満たされるとき $R > 1$ となる：

$$\omega_* - q\Phi_h = \omega - m\Omega_h - q\Phi_h < 0 \quad (8.2.14)$$

ここで、 Φ_h はブラックホールの静電ポテンシャルである。

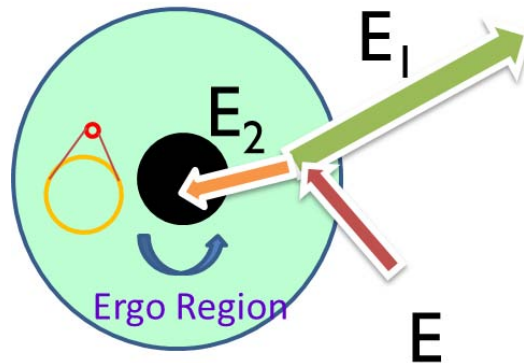


図 8.8: The Penrose process in the ergo region

Penrose 過程

エルゴ領域では、Penrose 過程と呼ばれる興味深い現象が起きる [18]. エルゴ領域では、時間推進 Killing ベクトル ξ が空間的となり、 p^μ が時間的でも、無限遠に対するエネルギー $E = -p \cdot \xi$ はふとなり得る. このため、エルゴ領域に入射した粒子が2つ以上の粒子に分裂すると、その一部が入射粒子より大きなエネルギーをもって、エルゴ領域から出ることが可能となる.

増幅反射条件は

$$k \cdot p > 0, \quad p_\mu \phi = (-i\partial_\mu - qA_\mu)\phi, \quad (8.2.15)$$

と表されるので、増幅反射は Penrose 過程と同じ機構で起きる. ここで、 $k = \partial_t + \Omega_h \partial_\varphi$ はホライズン \mathcal{H}^+ の光的接ベクトルである. この式は、 p が過去向きの時間的ベクトルであることを示している.

§8.3

増幅反射不安定

増幅反射が引き起こすブラックホール不安定

- BH bomb: 球形の反射壁でブラックホールを取り囲む [24, 20, 4]
- 有限な質量をもつボーズ場 [7]
- adS-Kerr ブラックホール [5]

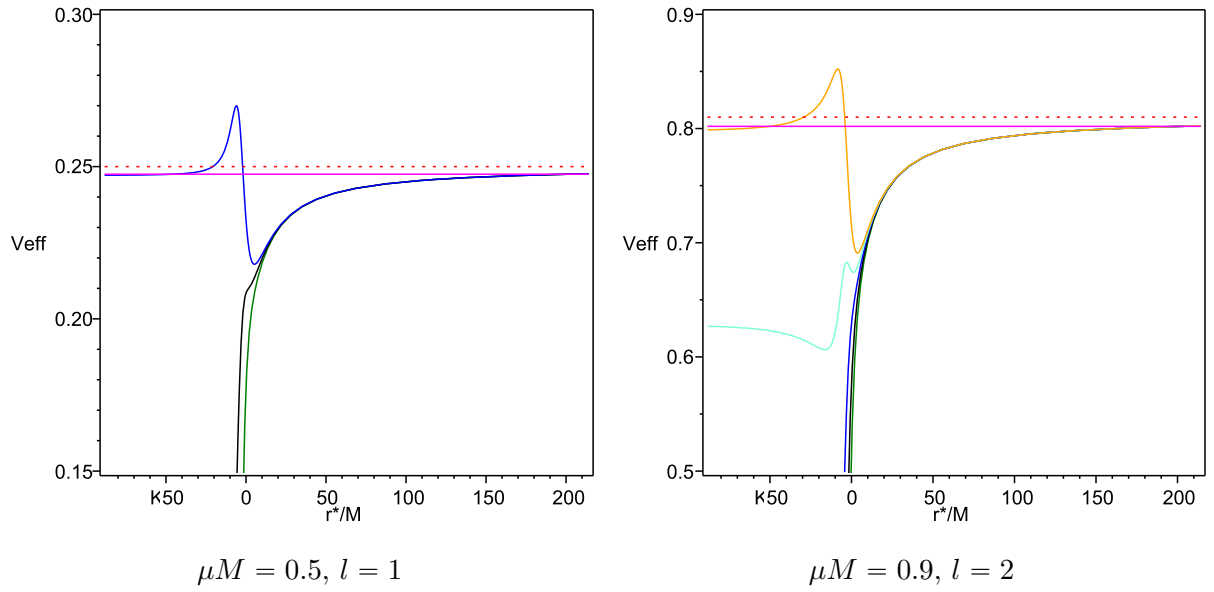


図 8.9: The effective potential for a massive scalar field around the Kerr BH with $a = 0.999$.

8.3.1 Kerr BH 時空での有質量スカラ場の方程式

- 有質量自由スカラ場の方程式：

$$(\square - \mu^2)\Phi = 0 \quad (8.3.1)$$

- 変数分離

$$\Phi = R_{lm}(r)S_{lm}(\theta) \exp(-i\omega t + im\phi), \quad (8.3.2)$$

とおくと,

$$\frac{1}{\sin\theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin\theta \frac{dS_{lm}}{d\theta} \right) + \left[a^2(\omega^2 - \mu^2) \cos^2\theta - \frac{m^2}{\sin^2\theta} + \Lambda_{lm} \right] S_{lm} = 0, \quad (8.3.3)$$

$$\frac{d}{dr} \left(\Delta \frac{dR_{lm}}{dr} \right) + \left[\frac{\omega^2(r^2 + a^2)^2 - 4Mam\omega r + m^2a^2}{\Delta} - (\omega^2a^2 + \mu^2r^2 + \Lambda_{lm}) \right] R_{lm} = 0. \quad (8.3.4)$$

- 角度モード関数と分離定数 Λ_{lm} : $S_{lm} = S_l^m(\cos\theta; c)$ ($c = a(\omega^2 - \mu^2)^{1/2}$) と書けるので, Λ_{lm} は l, m ($l = 0, 1, 2, \dots$) と c のみ依存し, $c \rightarrow 0$ の極限で

$$S_l^m \rightarrow P_l^m, \quad \Lambda_{lm} \rightarrow l(l+1). \quad (8.3.5)$$

- 動径モード関数の有効ポテンシャル： $u = (r^2 + a^2)^{1/2} R_{lm}$ とおくと，

$$\frac{d^2 u}{dr^{*2}} + [\omega^2 - V(r, \omega)] u = 0, \quad (8.3.6)$$

ここで，有効ポテンシャル V は，

$$V = \frac{\mu^2 \Delta}{r^2 + a^2} + \frac{4am\omega Mr - a^2 m^2 + \Delta[\Lambda_{lm} + (\omega^2 - \mu^2)a^2]}{(r^2 + a^2)^2} + \frac{\Delta(2Mr^3 + a^2 r^2 - 4Ma^2 r + a^4)}{(r^2 + a^2)^4}. \quad (8.3.7)$$

V の漸近挙動は

$$V \rightarrow \begin{cases} \mu^2 & ; r = \infty, \\ \omega^2 - \omega_*^2 & ; r = r_+ \end{cases}. \quad (8.3.8)$$

(Fig. 8.9).

- 境界条件：

$$\text{At infinity} : R_{lm} \sim \frac{B_{lm}}{r} e^{+ikr^*}, \quad k = (\omega^2 - \mu^2)^{1/2}. \quad (8.3.9a)$$

$$\text{At horizon} : R_{lm} \sim C_{lm} e^{-i\omega_* v_+ + im\bar{\phi}} \sim C_{lm} e^{-i\omega_* r^*} e^{-i\omega t + im\phi}. \quad (8.3.9b)$$

8.3.2 増大率

単位系 $c = \hbar = G = 1$.

1) 質量が大きい場合： $\mu M \gg 1$ (WKB 近似)

Reference

- T.J.M. Zouros and D.M. Eardley(1979)[25]

WKB 近似解 準束縛状態 $\omega^2 < \mu^2$ を考える．ポテンシャル障壁の影響が最小で，不安定性が最大となる $\omega_R \simeq \mu$ に限定し，解を4つの領域に分けて考える：I($r < r_1$)，II($r_1 < r < r_2$)，III($r_2 < r < r_3$)，IV($r > r_3$) (Fig.8.10)

- 振動的領域 I, III: $\omega^2 > V(r)$ なので，動径モードに対する WKB 解は，

$$R_{lm} = (r^2 + a^2)^{-1/2} u, \quad (8.3.10a)$$

$$u = k(r^*)^{-1/2} \{ A_+ e^{i\Theta(r)} + A_- e^{-i\Theta(r)} \}, \quad (8.3.10b)$$

ここで， A_{\pm} は定数で，

$$\Theta(r) = \int_{r_0^*}^{r^*} k(u) du, \quad k(r^*) = (\omega^2 - V(r))^{1/2}. \quad (8.3.11)$$

ただし， r_0^* は反射点 $\omega^2 = V(r)$ での r^* 座標の値．

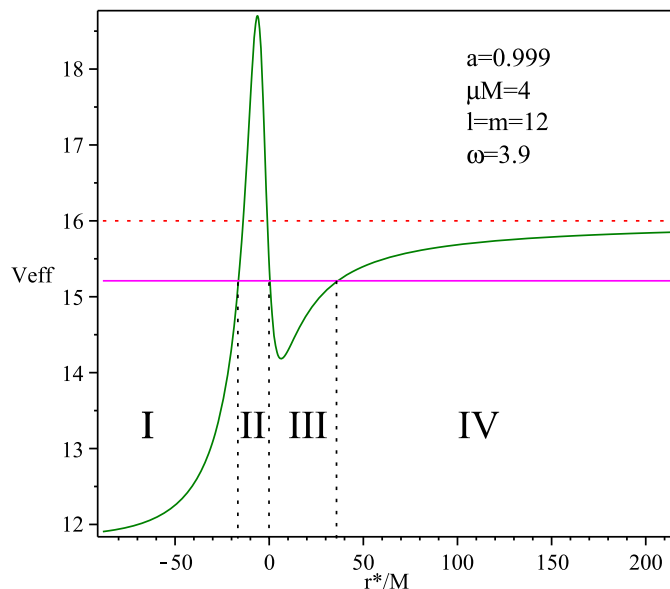


図 8.10: Division into four regions for the WKB approximation

- トンネル領域 II, IV: $\omega^2 < V(r)$ なので, 動径モードに対する WKB 解は,

$$u = \kappa(r^*)^{-1/2} \{B_- e^{-I(r)} + B_+ e^{I(r)}\}, \quad (8.3.12)$$

ここで, B_{\pm} は定数で

$$I(r) = \int_{r_0^*}^{r^*} \kappa(u) du, \quad \kappa(r^*) = (V(r) - \omega^2)^{1/2}. \quad (8.3.13)$$

- Airy 関数法: 接続点 (inflection pt) 近傍でのポテンシャルを線形近似すると, 振動領域では

$$\begin{aligned} u &= \sqrt{\frac{|\Theta|}{k}} \{C_+ J_{1/3}(|\Theta|) + C_- J_{-1/3}(|\Theta|)\} \\ &\sim \frac{1}{\sqrt{2\pi k}} \left[\left(C_+ e^{-\frac{5\pi i}{12}} + C_- e^{-\frac{\pi i}{12}} \right) e^{i|\Theta|} + \left(C_+ e^{\frac{5\pi i}{12}} + C_- e^{\frac{\pi i}{12}} \right) e^{-i|\Theta|} \right]. \end{aligned} \quad (8.3.14)$$

トンネル領域では

$$\begin{aligned} u &= \sqrt{\frac{|I|}{\kappa}} \{-C_+ I_{1/3}(|I|) + C_- I_{-1/3}(|I|)\} \\ &\sim \frac{1}{\sqrt{2\pi \kappa}} \left[(C_- - C_+) e^{|I|} + \left(C_- e^{-\frac{\pi i}{6}} - C_+ e^{-\frac{5\pi i}{6}} \right) e^{-|I|} \right]. \end{aligned} \quad (8.3.15)$$

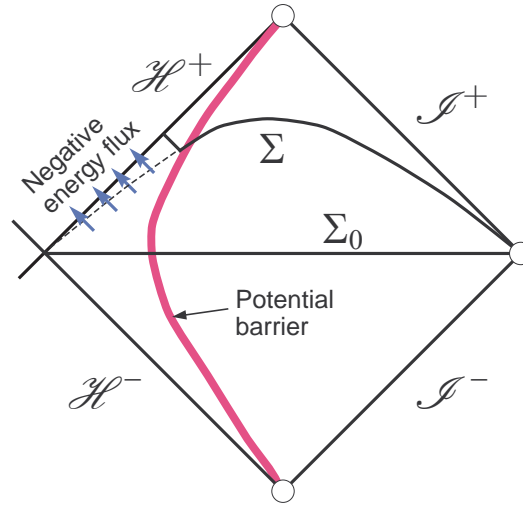


図 8.11: Flux integral to estimate the growth rate

- 解の接続：領域 I で infalling 条件 $A_+^I = 0$ を課し，得られた解を Airy 関数法で接続すると

$$A_-^I = A_0, \quad A_+^I = 0, \quad (8.3.16a)$$

$$B_+^{II} = e^{-\pi i/4} A_0, \quad B_-^{II} = 0, \quad (8.3.16b)$$

$$A_+^{III} = -iA_-^{III} = -ie^{I_{II}} A_0, \quad (8.3.16c)$$

$$B_-^{IV} = e^{-3\pi i/4} e^{I_{II} + i\Theta_{III}} A_0, \quad (8.3.16d)$$

$$(e^{\pi i/3} - 1)B_+^{IV} = 2e^{5\pi i/12} e^{I_{II}} \cos \Theta_{III}, \quad (8.3.16e)$$

ここで，

$$I_{II} = \int_{r_1^*}^{r_2^*} \kappa(r) dr^*, \quad \Theta_{III} = \int_{r_2^*}^{r_3^*} k(r) dr^*. \quad (8.3.17)$$

- 固有値方程式： 束縛状態を考えているので， B_+^{IV} . これは，振動数に対する Bohr-Sommerfeld の量子化条件を与える．

$$\omega = \omega_n : \int_{r_2^*}^{r_3^*} k(r) dr^* = \left(n + \frac{1}{2}\right) \pi, \quad n = 0, 1, \dots \quad (8.3.18)$$

不安定性増大率の評価 図 8.11 のような超曲面を考え，フラックス保存から，その上の KG ノルムの時間推進による変化率を求めると

$$-\omega_*(r_h^2 + a^2)|\tilde{R}|^2 = 2\omega_I N_{\Sigma'}(\Phi, \Phi). \quad (8.3.19)$$

これより, ω_I は次のように評価される :

$$\omega_I = \frac{1}{2}\gamma e^{-2I_{II}}, \quad (8.3.20)$$

$$\gamma^{-1} \simeq \int_{r_2^*}^{r_3^*} \frac{dr^*}{k(r)} 4 \cos^2 \left(\Theta - \frac{\pi}{4} \right) \left\{ \omega_n \left(1 - \frac{a^2 \zeta \Delta}{(r^2 + a^2)^2} \right) - \frac{2maMr}{(r^2 + a^2)^2} \right\} \quad (8.3.21)$$

Zouros と Eardley は, パラメータ $a/M, \mu M, l, m, \omega$ の広い領域で ω_I をこの式を用いて数値的に計算し, 成長率が次の時に最大となることを見いだした:

- i) l が最小,
- ii) m が最大, i.e., $m = l$,
- iii) a/M が最大, i.e., $a/M \simeq 1$,
- iv) ω_R が最大, i.e., $\omega_R \sim 0.98\mu < m\Omega_h$.

得られた成長率の最大値は, 各 μM の値に対して,

$$M\omega_I \sim 10^{-7} \exp(-1.84\mu M), \quad (8.3.22)$$

小さな因子 10^{-7} は (8.3.20) の γ に起因する.

2) 小質量の場合 : $\mu M \ll 1$ (MAE 法)

- References

- Detweiler S (1980)[8](Cf. Rosa J (2010)[21])

- $r \gg M$ での近似解

この領域では, $R = R_{lm}(r)$ の方程式 (8.3.4) は, 水素原子に対する Schrödinger 方程式と同じ形の方程式

$$\frac{d^2(rR)}{dr^2} + \left(\omega^2 - \mu^2 + \frac{2M\mu^2}{r} - \frac{l(l+1)}{r^2} \right) (rR) \approx 0, \quad (8.3.23)$$

で近似できる. したがって, $\sigma^2 = \mu^2 - \omega^2 > 0$ のとき, 準束縛状態の系列

$$R = \frac{A}{x} W_{\nu, l+1/2}(x) \sim e^{-x/2} x^\nu \quad (x = 2\sigma r \gg 1), \quad (8.3.24)$$

$$\nu = M\mu^2/\sigma = l + n + 1 + \delta\nu, \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (8.3.25)$$

を解として持つ. ここで, $\delta\nu$ は水素原子の厳密な束縛状態からのずれを表す複素数である. この解は, 領域 $\sigma M \ll x \ll 1$ では次のように振る舞う :

$$R \approx A(-1)^n \frac{(2l+1+n)!}{(2l+1)!} x^l + A(-1)^{n+1} n!(2l)!\delta\nu x^{-l-1}. \quad (8.3.26)$$

• $\mu r \ll l$ での近似解

この領域では、微分方程式 (8.3.4) は

$$z(z+1)\frac{d}{dz}\left[z(z+1)\frac{dR}{dz}\right] + \{P^2 - l(l+1)z(z+1)\}R = 0, \quad (8.3.27)$$

と近似できる。ここで、

$$z = \frac{r - r_+}{r_+ - r_-}, \quad P = -\frac{2Mr_+}{r_+ - r_-}\omega_* \quad (8.3.28)$$

この方程式は厳密に解けて、ホライズンに落ち込む解は

$$R = C \left(\frac{z}{z+1}\right)^{iP} F(-l, l+1, 1+2iP; -z). \quad (8.3.29)$$

この解は、領域 $1 \ll z \ll l/(\omega_R M)$ では次のように近似される：

$$R \approx C \frac{(2l)!\Gamma(1+2iP)}{l!\Gamma(l+1+2iP)} z^l + C(-1)^{l+1} \frac{l!\Gamma(1+2iP)}{(2l+1)!\Gamma(-l+2iP)} z^{-l-1}. \quad (8.3.30)$$

• 成長率

これら2つの領域での漸近近似解が共通領域で一致することを要請すると、

$$\delta\nu = 2iP [2\sigma(r_+ - r_-)]^{2l+1} \frac{(2l+1+n)!}{n!} \left[\frac{l!}{(2l)!(2l+1)!} \right]^2 \prod_{j=1}^l (j^2 + 4P^2). \quad (8.3.31)$$

これより、成長率が

$$\omega_R \simeq \mu \left\{ 1 - \left(\frac{\mu M}{l+1+n} \right)^2 \right\}^{1/2} \approx \mu \quad (8.3.32a)$$

$$\omega_I = 2\gamma\mu r_+(m\Omega_h - \mu)(\mu M)^{4l+4}, \quad (8.3.32b)$$

と決まる。ここで、

$$\gamma = \frac{2^{4l+2}(2l+1+n)!}{n!(l+1+n)^{2l+4}} \left(\frac{l!}{(2l)!(2l+1)!} \right)^2 \prod_{j=1}^l [j^2(1 - a^2/M^2) + 4r_+^2(\mu - m\Omega_h)^2]. \quad (8.3.33)$$

この成長率は、 $l = m = 1$ かつ $a/M \sim 1$ で次の最大値を取る：

$$\omega_I \approx \frac{a}{24M^2}(\mu M)^9. \quad (8.3.34)$$

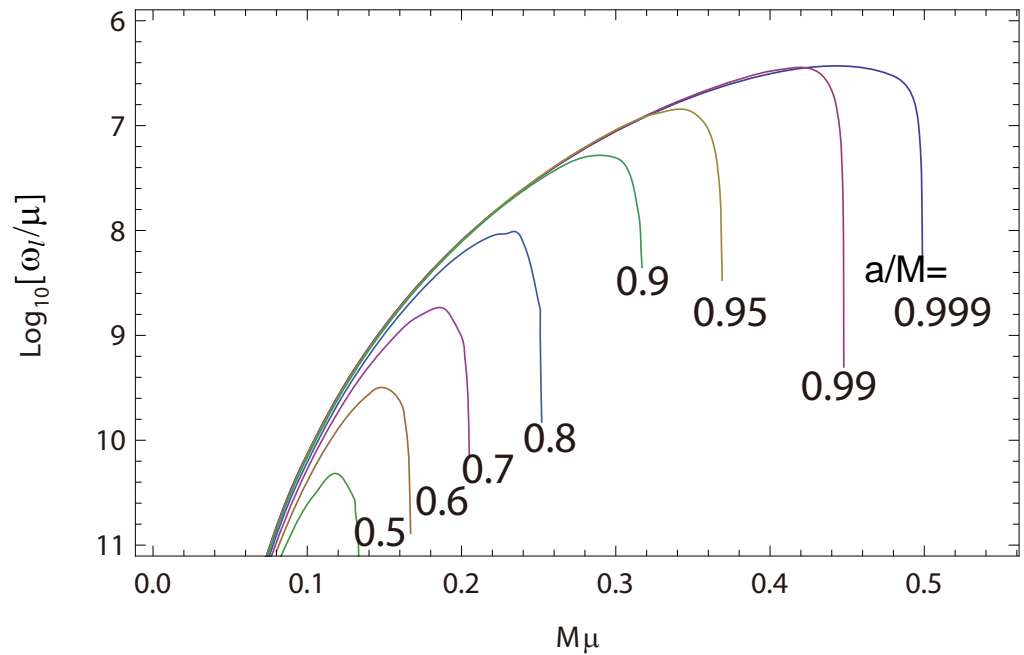


図 8.12: The instability growth rate for $l = m = 1$.

3) 数値計算による評価

- References

- Cardoso V, Yoshida (2005):最初の計算 [6]
- Leaver E (1985):Leaver 法 [17]
- Dolan S:[9].
- 高次元ブラックホールの QNM [6, ?]
- 高次元 adS 単純回転ブラックホールの SR 不安定 [14, 13].

- 動径モード関数 R の級数展開

$$R(r) = \frac{x^{-i\sigma}}{(r - r_-)\chi^{-1}} e^{-\sigma r} \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n, \quad x = \frac{r - r_+}{r - r_-}, \quad (8.3.35)$$

ここで

$$q = \frac{2r_+(\omega - m\Omega_h)}{r_+ - r_-}, \quad \sigma = (\mu^2 - \omega^2)^{1/2}, \quad \chi = -(\mu^2 - 2\omega^2)/\sigma. \quad (8.3.36)$$

- 展開係数の漸化式

これを動径方程式 (8.3.4) に代入すると, 展開係数 a_n に対する 3 項漸化式

$$\alpha_n a_{n+1} + \beta_n a_n + \gamma_n a_{n-1} = 0. \quad (8.3.37)$$

を得る。ここで、

$$\alpha_n = (n+1)(n+c_0), \quad \beta_n = -2n^2 + (c_1+2)n + c_3, \quad \gamma_n = n^2 + (c_2-3)n + c_4,$$

ただし、 c_1, \dots, c_4 は ω, σ, m と Λ_{lm} で決まる定数。

● 連分数解

$n \rightarrow \infty$ で a_{n+1}/a_n がゼロに収束するとき、

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} = -\frac{\gamma_{n+1}}{\beta_{n+1} + \alpha_{n+1} \frac{a_{n+2}}{a_{n+1}}} = -\frac{\gamma_{n+1}}{\beta_{n+1}-} \frac{\alpha_{n+1} \gamma_{n+2}}{\beta_{n+2}-} \frac{\alpha_{n+2} \gamma_{n+3}}{\beta_{n+3}-} \dots \quad (8.3.38)$$

$a_1/a_0 = -\beta_0/\alpha_0$ なので、この方程式で $n = 0$ とおくと、 $\omega = \omega_R + i\omega_I$ に対する固有値方程式が得られる:

$$\beta_0 - \frac{\alpha_0 \gamma_1}{\beta_{1-}} \frac{\alpha_1 \gamma_2}{\beta_{2-}} \frac{\alpha_2 \gamma_3}{\beta_{3-}} \dots = 0. \quad (8.3.39)$$

この連分数は収束が早く、適当な n で打ち切ることにより、良い精度で固有値 ω^2 を求めることができる。図8.12は、 $l = m = 1$ に対する解の例である。

§8.4

実際に宇宙に存在するブラックホールの引き起こすアクシオン不安定

References

- the axiverse paper[1]
- Arvanitaki A, Dubovsky A[2]

8.4.1 $\mu - M$ 平面での不安定帯

増幅反射不安定の成長率 (まとめ)

$$\frac{\tau}{GM} \approx \begin{cases} 10^7 e^{1.84\alpha_g} & ; \alpha_g \gg 1, a = 1 \\ 24 \left(\frac{a}{M}\right)^{-1} (\alpha_g)^{-9} & ; \alpha_g \ll 1, \end{cases} \quad (8.4.1)$$

ここで

$$\alpha_g := GM\mu = \frac{\mu}{1.34 \cdot 10^{-10} \text{eV}} \cdot \frac{M}{M_\odot}. \quad (8.4.2)$$

成長率は $\alpha_g \sim 1$ で最大:

$$\tau_{\text{sr}} \approx 0.2 \cdot 10^7 GM; \quad \alpha_g \simeq 0.44, \quad a/M \simeq 0.999. \quad (8.4.3)$$

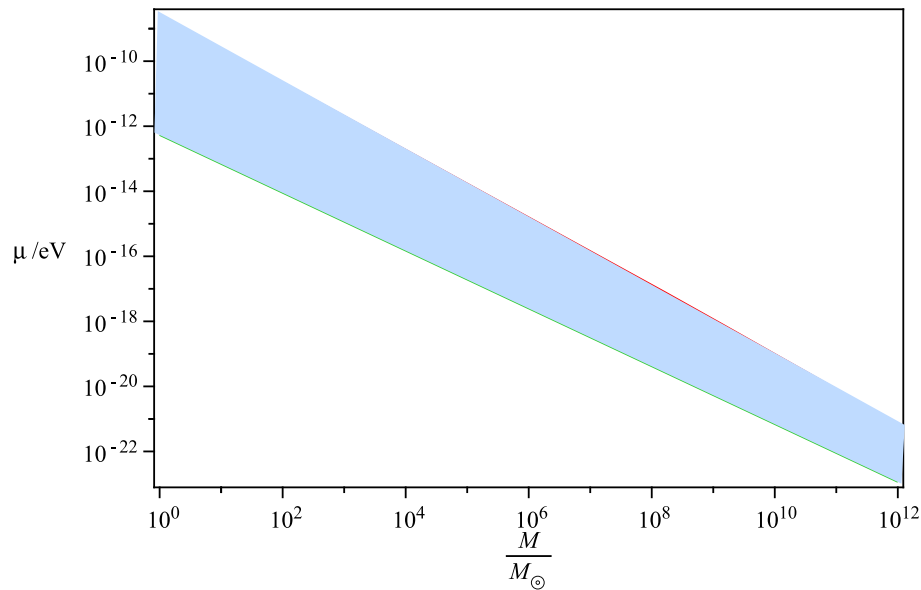


図 8.13: 不安定性成長時間が宇宙年齢以下となる $\mu - M$ の帯状領域

不安定性の起きる質量

- スカラ場の質量が 10^{-10}eV のとき、太陽質量 $M \sim M_{\odot}$ のブラックホールで不安定が実際に起きる。
- この質量は、QCD アクシオンの場合 $f_a \sim 10^{16}\text{GeV}$ に対応。
- ただし、現在の存在量が観測と整合的となるには、アクシオン場の初期振幅を $10^{-3}f_a$ 程度に小さく調整しないとイケない。

不安定性の時間発展

- 不安定性の成長は、BH の角運動量の減少をもたらす。
- このため、ある程度不安定性が成長すると、成長時間が宇宙年齢を超え、安定化する。

不安定帯

- 不安定性の成長率は、パラメーター $\alpha_g = \mu M$ に非常に敏感。
- このため、成長率が宇宙年齢以下となるパラメータ領域は、 $\mu - M$ 平面で狭い帯状の領域となる。(図 8.13)
- 例えば、アクシオンの質量が $\mu \approx 10^{-14}\text{eV}$ のとき、質量が $10^2 M_{\odot} - 10^5 M_{\odot}$ の範囲にある BH のみが不安定性を引き起こす。このため、この帯域の BH の角運動量は、他の質量の BH より小さい角運動量を持つことになる。

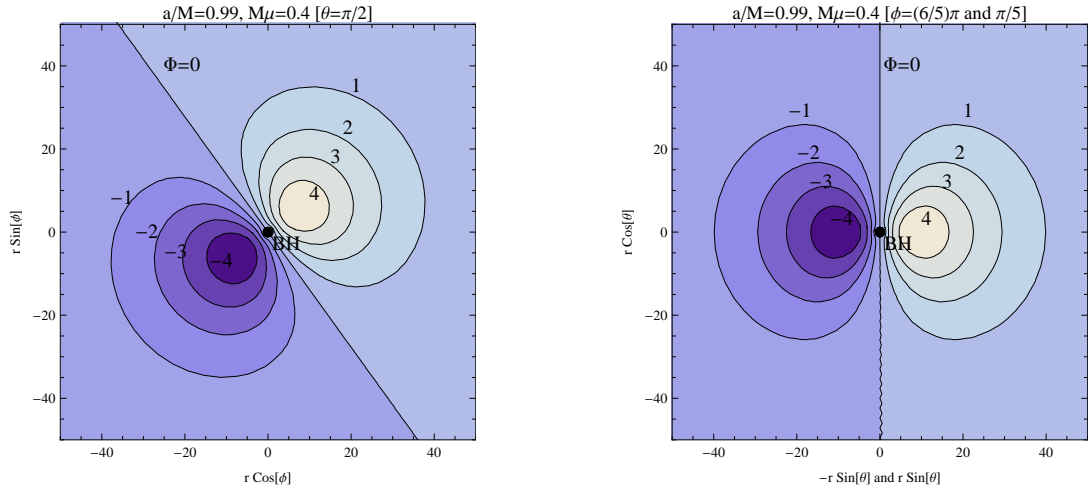


図 8.14: 最も不安定なモード ($l = m = 1$) の波動関数の分布. 左は赤道面, 右は z 軸を含む面での振幅.

8.4.2 G-atom

- 不安定が大きくなる束縛状態 $\omega \approx \mu$ では, μM が小さい場合のエネルギーレベルは (8.3.32a) より,

$$\omega_R^2 \simeq \mu^2 \left(1 - \frac{\alpha_g^2}{2n^2} \right), \quad \omega_R < m\Omega_h, \quad (8.4.4)$$

ここで, $n = n' + l + 1$ ($n' = 0, 1, 2 \dots$).

- 最も不安定となるモード $n' \sim 0$ に対し, n は

$$n \simeq l \sim \frac{\mu}{\Omega_h} = \alpha_g \frac{2r_h}{a}. \quad (8.4.5)$$

- したがって, モード関数のピークはエルゴ領域の外に有り, ホライズンから遠い:

$$\frac{r}{R_g} \sim \frac{n^2}{\alpha_g^2} \sim 4 \left(\frac{r_h}{a} \right)^2 \Rightarrow \mu r \sim 4\alpha_g \left(\frac{r_h}{a} \right)^2 \sim 1 \quad (8.4.6)$$

これは, $a \sim M$ の場合, 最も不安定な束縛状態は完全に量子的な状態となることを意味している. 従って, 増幅反射不安定は, 中心のブラックホールをアキシオンの量子雲が取り囲む重力原子 (G-atom) を生み出す. (図 8.14)

8.4.3 重力波放出

図 8.14 に示したように, G 原子のアキシオン雲は非球対称で回転している. このため, G 原子は重力波を放出する.

4 重極公式による評価

- (8.4.6) より, 雲は $r_c \sim M(l+1)^2/\alpha_g^2$ 程度の半径をもち, $\Omega = (M/r_c^3)^{1/2}$ 程度の角速度で回転している. これより, 4重極公式を使うと, 単位時間あたりにアクシオン雲から放出される重力波のエネルギーは

$$P = \frac{G}{45} |\ddot{Q}|^2 \sim \frac{G}{45} (r_c^2 \epsilon M)^2 \Omega^6 \sim \frac{\epsilon^2 \alpha_g^{10}}{45 G (l+1)^{10}} = G \frac{N^2 \alpha_g^{12}}{45 (l+1)^{10} (GM)^4}, \quad (8.4.7)$$

ここで, N は雲に含まれるアクシオン量子の数, $\epsilon = \mu N/M$ は雲の質量とBHの質量の比.

- 4重極公式は, アクシオン雲の異なる量子レベルの間の遷移により放出される重力波の評価となっている. したがって, $l \geq 2$ が必要で, 重力波によるエネルギー放出で系のエネルギーが変化する時間スケールは

$$\tau_{\text{GW}} \sim \frac{\epsilon M}{P} \approx \frac{45 GM (l+1)^{10}}{\epsilon \alpha_g^{10}} \approx 10^{14} GM \left(\frac{10^{-4}}{\epsilon} \right) \left(\frac{l+1}{3} \right)^{10} \left(\frac{0.44}{\alpha_g} \right)^{10}. \quad (8.4.8)$$

これより, $\epsilon \sim 10^{-4}$, $\alpha_g \gtrsim 1$ に対し

$$\tau_{\text{GW}}/\tau_{\text{sr}} \approx 0.1 \times e^{-1.844(\alpha_g-2)} (2/\alpha_g)^{10}. \quad (8.4.9)$$

- 時間発展

- * $\alpha_g < 2$: GW 放出は SR 不安定の成長を妨げない.
- * $\alpha_g > 2$: $\epsilon \sim 10^{-4}$ のとき, $\tau_{\text{GW}} = \tau_{\text{sr}}$. すなわち, $\epsilon \sim 10^{-4}$ に達すると, SR 不安定にもかかわらずアクシオン雲は成長を止める. 一般に, α_g が大きいほど, 小さな ϵ で定常状態に達する.

- GW の観測可能性

(8.4.7) より, 観測される GW の振幅は

$$h \approx 10^{-22} \left(\frac{\epsilon}{10^{-4}} \right) \left(\frac{c^3}{GM\omega} \right) \left(\frac{100 \text{Mpc}}{d} \right) \left(\frac{M}{10^5 M_\odot} \right) \left(\frac{\alpha_g}{2} \right)^5 \left(\frac{3}{l+1} \right)^5 \quad (8.4.10)$$

これより, 質量が $10^{-15} \text{eV} \lesssim \mu \lesssim 10^{-20} \text{eV}$ の範囲にあるアクシオンが存在すると, 増幅反射不安定により放出された GW が advanced LIGO などで検出可能となる.

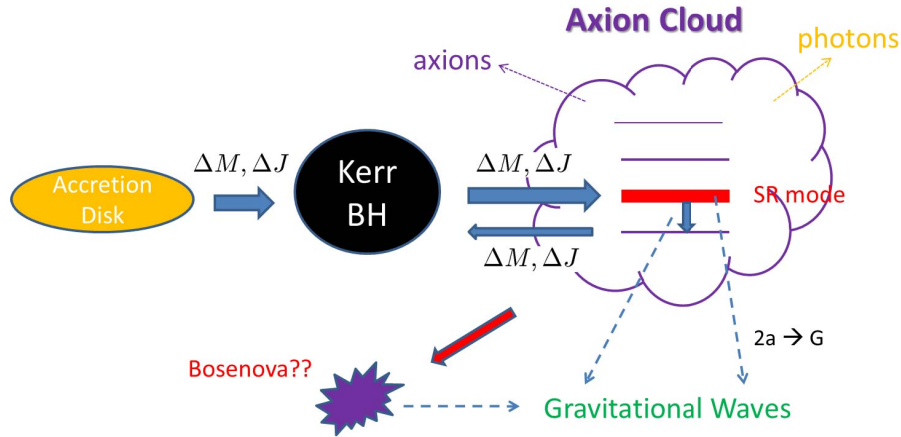


図 8.15: The fate of an axion cloud around a black hole formed by instability.

重力波放出量に対する公式

無限遠でのエネルギーフラックス TT ゲージ条件 (??) を満たす重力波型摂動 h_{ij}^{TT} に対し, そのエネルギー運動量テンソルを

$$4\kappa^2 T_{\mu\nu}^{\text{GW}} = \partial_\mu h^{\text{TT}ij} \partial_\nu h_{ij}^{\text{TT}} - \frac{1}{2} \eta_{\mu\nu} (\partial_\lambda h^{\text{TT}ij} \partial_\lambda h_{ij}^{\text{TT}}) \quad (8.4.11)$$

により定義する. いま, \mathcal{I}^+ 近傍で h_{ij} が

$$h_{rr}^{\text{TT}}, \frac{1}{r} h_{rA}^{\text{TT}} \sim \mathcal{O}\left(\frac{1}{r^2}\right), \quad (8.4.12)$$

$$(h^{\text{TT}})_A^B(r\Omega, t) \sim \frac{1}{r} \sum_{\omega, s, l, m} \left[A_{slm}(\omega) (Y_{lm}^{(s)})_{AB}(\Omega) e^{-i\omega u} + \text{cc} \right], \quad (8.4.13)$$

$$\int_{S^2} d\Omega Y_{lm}^{(s)} (Y_{l'm'}^{(s')})^* = C_{lm}^s \delta^{ss'} \delta_{ll'} \delta_{mm'} \quad (8.4.14)$$

と振る舞うとき, 無限遠に放出されるエネルギーは

$$\begin{aligned} E_{\mathcal{I}^+} &= \int_{\mathcal{I}^+} T_\mu^t d\Sigma^\mu \\ &= \lim_{r \rightarrow \infty} r^2 \int du \int_{S^2} d\Omega (-T_t^t + T_r^t) \\ &= \frac{1}{8\kappa^2} \lim_{r \rightarrow \infty} r^2 \int du \int_{S^2} d\Omega (\partial_u h^{\text{TT}ij})^2 \\ &= \frac{T}{4\kappa^2} \sum_{lms, \omega} \omega^2 |A_{lm}^s(\omega)|^2. \end{aligned} \quad (8.4.15)$$

重力波放出率 一般に, $u_{\mu\nu}^{\text{TT}}$ を真空での波動方程式

$$\square h_{\mu\nu} = 0 \quad (8.4.16)$$

の TT-gauge での任意の解, $\psi_{\mu\nu}$ を源のある波動方程式

$$\Delta_L \psi_{\mu\nu} = -\square \psi_{\mu\nu} - 2R_{\mu\alpha\nu\beta} \psi^{\alpha\beta} = -2\kappa^2 T_{\mu\nu} \quad (8.4.17)$$

の解とする. このとき, 任意の時空領域 D に対して,

$$\begin{aligned} N_{\partial D}(u^{\text{TT}}, \psi) &:= i \int_{\partial D} d\Sigma_\mu u_{\alpha\beta}^{\text{TT}*} \overleftrightarrow{\partial}^\mu \psi^{\alpha\beta} = i \int_D d^4x u_{\alpha\beta}^{\text{TT}*} \Delta_L \psi^{\alpha\beta} \\ &= -2i\kappa^2 \int_D d^4x u_{\mu\nu}^{\text{TT}*} T^{\mu\nu}. \end{aligned} \quad (8.4.18)$$

この式で D の境界を \mathcal{I}^+ まで押しやると, 左辺への無限遠よりの寄与は ψ のゲージ変換に対して不変で (後述),

$$N_{\mathcal{I}^+}(u^{\text{TT}}, \psi) = N_{\mathcal{I}^+}(u^{\text{TT}}, h) = N_{\mathcal{I}^+}(u^{\text{TT}}, h^{\text{TT}}). \quad (8.4.19)$$

よって, u^{TT} として, \mathcal{I}^+ で

$$u_{\omega,s,l,m}^{\text{TT}} \sim \frac{1}{r} (Y_{lm}^{(s)}) e^{-i\omega u}, \quad (8.4.20)$$

ホライズン \mathcal{H}^+ でゼロとなる複素基本解を用いると,

$$T \times 2\omega C_{lm}^s A_{lm}^s = -2i\kappa^2 \int_D d^4x \sqrt{-g} u_{\omega,s,l,m}^{\text{TT}\mu\nu} {}^* T_{\mu\nu}. \quad (8.4.21)$$

以上より,,

$$\langle u, T \rangle := \frac{1}{T} \int_D d^4x \sqrt{-g} u^{\mu\nu} T_{\mu\nu} \quad (8.4.22)$$

と定義すると,

$$\dot{E}_{\mathcal{I}^+} = \frac{\kappa^2}{4} \sum_{lms,\omega} |C_{lm}^s|^{-2} |\langle u_{lms,\omega}^{\text{TT}}, T \rangle|^2. \quad (8.4.23)$$

平坦背景時空近似

背景時空を平坦時空で近似すると, $u_{lms,\omega}^{\text{TT}}$ および Φ を具体的に求めることができ, 重力波放出率を準解析的に求めることができる. ただし, この近似は $\mu M \ll 1$ の時にのみ良い近似となり, 特に Φ は

$$\hat{\Phi} = -\frac{\sqrt{2E_a}}{\omega} (2k)^{3/2} \sqrt{\frac{(n-\ell-1)!}{2n(n+\ell)!}} e^{-i\omega t} e^{-kr} (2kr)^\ell L_{n-\ell-1}^{2\ell+1}(2kr) Y_{\ell m}(\theta, \phi). \quad (8.4.24)$$

ただし,

$$k := \sqrt{\mu^2 - \omega^2} = \frac{M\mu^2}{n}; \quad n := \ell + 1 + n_r, \quad n_r = 0, 1, 2, \dots \quad (8.4.25)$$

また, E_a はアキシオンの全エネルギーを表す量:

$$E_a = \int T_{tt} r^2 dr \sin\theta d\theta d\phi. \quad (8.4.26)$$

- ベクトル型摂動：このときは $\dot{P} = 0$.
- スカラ型摂動：

$$\frac{dE_{\text{GW}}}{dt} = C_{nl} \left(\frac{E_a}{M} \right)^2 (\mu M)^{Q_\ell}, \quad (8.4.27a)$$

$$Q_\ell = \begin{cases} 16, & (\ell = 1), \\ 4\ell + 10, & (\ell \geq 2), \end{cases} \quad (8.4.27b)$$

$$C_{nl} = \begin{cases} \frac{\pi^2 (n^2 - 1)^2}{160 n^{10}}, & (\ell = 1), \\ \frac{16^{\ell+1} \ell (\ell - 1)^2 [(\ell + n)!]^2 \Gamma(2\ell)^2}{(2\ell - 1)(\ell + 1)(\ell!)^4 \Gamma(4\ell + 3) \Gamma(n - \ell)^2 n^{4\ell+8}}, & (\ell \geq 2). \end{cases} \quad (8.4.27c)$$

Kerr 時空での評価

8.4.4 ボーズノバ

準解析的な解析

- 自己相互作用

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[-\frac{1}{2} (\nabla\phi)^2 - 2\mu^2 f_a^2 \sin^2 \left(\frac{\phi}{2f_a} \right) \right]. \quad (8.4.28)$$

- 非相対論的近似

$$\phi \simeq \frac{1}{\sqrt{2\mu}} (e^{-i\mu t} \psi + e^{i\mu t} \psi^*). \quad (8.4.29)$$

とおくと、 $|\phi|/f_a \ll 1$ のとき、

$$S_{\text{NR}} = \int d^4x \left[i\psi^* \partial_t \psi - \frac{1}{2\mu} \partial_i \psi \partial_i \psi^* - \mu \Phi_g \psi^* \psi + \frac{1}{16f_a^2} (\psi^* \psi)^2 \right]. \quad (8.4.30)$$

- 最後の項が、小振幅の時の主要な非線形効果を現す。この相互作用は引力なので、アクシオン雲が十分成長し高密となると、ボーズ・アインシュタイン凝縮の場合と同様、ボーズノバといわれる爆縮現象が起きることが予想される [2].

- アクシオン雲の全エネルギー

$$\begin{aligned} E &= \frac{V}{2\mu} \langle |\nabla\psi|^2 \rangle + \mu \Phi_g V \langle |\psi|^2 \rangle - \frac{V}{16f_a^2} \langle |\psi|^4 \rangle \\ &\approx \frac{N}{2\mu} \left(\frac{l^2}{r^2} + \frac{1}{R^2} \right) - \frac{\alpha_g N}{r} - \frac{N^2}{16f_a^2 R^3}, \end{aligned}$$

ここで、 r は雲の中心と BH 中心の距離、 R は雲の広がりサイズ、 E が極小となる r を求めると、アキシオン雲に対する Kepler 半径が得られる：

$$r_c \approx \frac{l^2}{\alpha_g \mu} \Rightarrow E \approx \frac{N}{2\mu R^2} - \frac{N^2}{16f_a^2 R^3} - \frac{\alpha_g N}{2r_c}. \quad (8.4.31)$$

- ボーズノバ

このエネルギーは、

$$R = R_m \equiv \frac{3\mu N}{16f_a^2} \quad (8.4.32)$$

で極大となる。このサイズが $R_m < r_c$ を満たすときは、雲のサイズは $R \sim r \sim r_c$ で安定化する。しかし、図 8.20 に示したように、 $r_c < R_m$ となると、 $R < r_c$ でエネルギー E は R の単調増加関数となり、最初 $R \sim r$ であった雲は不安定となり急速につぶれる。これは、雲の質量が臨界値

$$r_c < R_m \Leftrightarrow \mu N > \frac{16l^2 f_a^2}{3\alpha_g \mu} \Leftrightarrow \epsilon = \frac{\mu N}{M} > \frac{l^2 f_a^2}{\alpha_g^2 m_{\text{pl}}^2} \approx 10^{-4}. \quad (8.4.33)$$

を超えると起きる。

数値シミュレーション

概要 実際のアキシオン相互作用は4次ではなく、 $\cos(\phi/f_a)$ に比例し、 $|\phi|/f_a$ が1のオーダーとなると飽和する。したがって、実際にボーズノバが起きるかどうか、また、その様子を知るには周知シミュレーションが必要となる。

References

- Yoshino H, Kodama H (2012) [23]

モデルとパラメーター 線形理論における SR 不安定解のうち、 $l = m = 1, n = 1$ となるモードに以下の振幅を与えて初期値とする。

Simulations	Initial condition	$E/[(f_a/M_p)^2 M]$	nonlinearity
(A)	KG bound state, $\varphi_{\text{peak}}^{(A)}(0) = 0.60$	1430	weak
(B)	KG bound state, $\varphi_{\text{peak}}^{(B)}(0) = 0.70$	1862	strong

結果

- $\phi \sim f_a \Leftrightarrow \epsilon \sim 10^{-4}$ となると, 実際にボーズノバに対応するアクシオン雲の崩壊が起きる。(図 8.21)
- 臨界値より十分小さい振幅の線形解を初期値とすると, 雲の位置および広がり
の長周期振動が起きるが, 崩壊は起こらない. この振動は, SR 不安定成長率を
増大させる傾向をもつ.
- アクシオン雲の崩壊が起きると, SR 不安定成長はとまり, BH に正のエネルギー
が落下する. ただし, BH の角運動量は減少し続ける. これは, $l = 1, m = -1$ の
モードが生成されることを意味する.
- アクシオン雲の崩壊に伴い, 外に向かってエネルギーが放出される.

有効ポテンシャルによる解析

- $\varphi = \Phi/f_a$ に対する相対論的な作用積分

$$\hat{S} = \int d^4x \sqrt{-g} \left[-\frac{1}{2}(\nabla\varphi)^2 - \mu^2 \left(\frac{\varphi^2}{2} + \hat{U}_{\text{NL}}(\varphi) \right) \right], \quad (8.4.34)$$

$$\hat{U}_{\text{NL}}(\varphi) = 1 - \frac{\varphi^2}{2} - \cos\varphi = - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n)!} \varphi^{2n}. \quad (8.4.35)$$

- 非相対論的近似

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{2\mu}} (e^{-i\mu t}\psi + e^{i\mu t}\psi^*). \quad (8.4.36)$$

とおくと、ニュートン近似で、 ψ に対する作用は

$$\begin{aligned} \hat{S}_{\text{NR}} &= \int d^4x \left[\frac{i}{2} (\psi^*\dot{\psi} - \dot{\psi}\psi^*) - \frac{1}{2\mu} \partial_i\psi\partial_i\psi^* + \frac{\alpha_g}{r}\psi^*\psi - \mu^2 \tilde{U}_{\text{NL}}(|\psi|^2) \right], \\ \tilde{U}_{\text{NL}}(x) &= - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1/2)^n}{(n!)^2} x^n. \end{aligned} \quad (8.4.38)$$

ここで、 $\alpha_g := M\mu$,

- 集団変数: アクション波動関数 ψ として次の形のもの考える :

$$\psi = A(t, r, \nu) e^{iS(t, r, \nu) + m\phi}, \quad (8.4.39)$$

$$A(t, r, \nu) \approx A_0 \exp \left[-\frac{(r - r_p)^2}{4\delta_r r_p^2} - \frac{(\nu - \nu_p)^2}{4\delta_\nu} \right], \quad (8.4.40)$$

$$S(t, r, \nu) \approx S_0(t) + p(t)(r - r_p) + P(t)(r - r_p)^2 + \pi_\nu(t)(\nu - \nu_p)^2 \quad (8.4.41)$$

以下では、 $m = 1, \nu_p = 0$ とおく。集団座標の意味は

- $\delta_r(t)$: 波束の動径方向の広がり.
- $\delta_\nu(t)$: 波束の θ 方向の広がり.
- $(r_p(t), \nu_p(t))$: 波束のピーク位置の座標.

- 有効作用: 総アクション数を

$$N = \int d^3x A^2 \approx 4\pi^2 A_0^2 \sqrt{\delta_r \delta_\nu} r_p^3 (1 + \delta_r). \quad (8.4.42)$$

で定義すると、集団変数に対する有効作用は、

$$L = -\dot{S}_0 N + p\dot{r}_p N + (\dot{p} - 2P\dot{r}_p)2r_p \frac{\delta_r}{1 + \delta_r} N - \dot{P}r_p^2 \delta_r \frac{1 + 3\delta_r}{1 + \delta_r} N - \dot{\pi}_\nu \delta_\nu N \quad (8.4.43a)$$

$$H = T + V; \quad (8.4.43b)$$

$$T = \frac{N}{2\mu} \left[p^2 + 8pPr_p \frac{\delta_r}{1 + \delta_r} + 4P^2 r_p^2 \delta_r \frac{1 + 3\delta_r}{1 + \delta_r} + 4\pi_\nu^2 \frac{\delta_\nu}{r_p^2(1 + \delta_r)} \right], \quad (8.4.43c)$$

$$\frac{V}{N\mu\alpha_g^2} = \frac{1}{2(\alpha_g\mu r_p)^2(1 + \delta_r)} \left(1 + \delta_\nu + \frac{1}{4\delta_r} + \frac{1}{4\delta_\nu} \right) - \frac{1}{(\alpha_g\mu r_p)(1 + \delta_r)} \quad (8.4.43d)$$

$$-\alpha_g^{-2} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1/2)^n}{(n!)^2 n} \left[\frac{N_*}{\sqrt{\delta_r \delta_\nu} (\alpha_g\mu r_p)^3 (1 + \delta_r)} \right]^{n-1}, \quad (8.4.43e)$$

ここで

$$N_* = (\alpha_g^3 \mu^2 / 4\pi^2) N. \quad (8.4.44)$$

ただし、 δ_ν について1次の項のみを残した。

- これは次の様書き換えられる：

$$L = T - V; \quad (8.4.45a)$$

$$T = \frac{1}{2} A \dot{\delta}_r^2 + B \dot{\delta}_r \dot{r}_p + \frac{1}{2} C \dot{r}_p^2 + \frac{1}{2} D \dot{\delta}_\nu^2, \quad (8.4.45b)$$

ここで、

$$A = \frac{1}{4} N \mu r_p^2 \frac{1 + 45\delta_r + 198\delta_r^2 + 126\delta_r^3 + 45\delta_r^4 + 9\delta_r^5}{(1 + \delta_r)^3 \delta_r (1 + 3\delta_r^2)}, \quad (8.4.46a)$$

$$B = \frac{1}{2} N \mu r_p \frac{-7 - 30\delta_r + 54\delta_r^2 + 30\delta_r^3 + 9\delta_r^4}{(1 + \delta_r)^2 (1 + 3\delta_r^2)}, \quad (8.4.46b)$$

$$C = N \mu \frac{1 + 6\delta_r - 26\delta_r^2 + 18\delta_r^3 + 9\delta_r^4}{(1 + \delta_r)(1 + 3\delta_r^2)}, \quad (8.4.46c)$$

$$D = \frac{1}{4} N \mu r_p^2 \frac{(1 + \delta_r)}{\delta_\nu}. \quad (8.4.46d)$$

- ポテンシャルの N_* 依存性：3次元の変数空間 $(\delta_r, \delta_\nu, \alpha_g\mu r_p)$ における極点は、元のポテンシャルの形や N_* の値によらず、常の次の関係式で決まる曲線上に載ることが占めさえる：

$$\delta_r = \frac{-1 + 4\delta_\nu^2 + \sqrt{1 - 8\delta_\nu + 8\delta_\nu^2 + 64\delta_\nu^3 + 16\delta_\nu^4}}{2(-2 + 4\delta_\nu + 16\delta_\nu^2)}, \quad (8.4.47a)$$

$$\alpha_g\mu r_p = 4\delta_\nu - \frac{1}{2\delta_\nu} + \frac{1}{4\delta_r} + 1. \quad (8.4.47b)$$

この曲線上でのポテンシャルの振る舞いと極点の位置をプロットしたのが図8.33と図8.34である。

- 極小点における振動周期

- $\alpha_g = 0.4, N_* = 1.1.$

$$\left(\frac{\omega_{\text{EG}}}{\mu\alpha_g^2}\right)^2 = 1.141, 0.249, \text{ and } 0.0166, \quad (8.4.48)$$

$$\Delta q_i = \begin{pmatrix} 0.110 \\ -0.027 \\ 0.994 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 0.075 \\ 0.724 \\ 0.686 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} -0.378 \\ -0.005 \\ 0.925 \end{pmatrix} \quad (8.4.49)$$

第3の固有振動は長周期振動を説明する：

$$\Delta t = 761M. \quad (8.4.50)$$

- $\alpha_g = 0.4, N_* = 1.3$

$$\left(\frac{\omega_{\text{EG}}}{\mu\alpha_g^2}\right)^2 = 14.06, 5.59, \text{ and } 0.175, \quad (8.4.51)$$

$$\Delta q_i = \begin{pmatrix} 0.218 \\ -0.030 \\ 0.975 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 0.070 \\ 0.927 \\ 0.367 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} -0.640 \\ -0.085 \\ 0.763 \end{pmatrix} \quad (8.4.52)$$

第1の固有振動は短周期振動を説明する：

$$\Delta t = 26M. \quad (8.4.53)$$

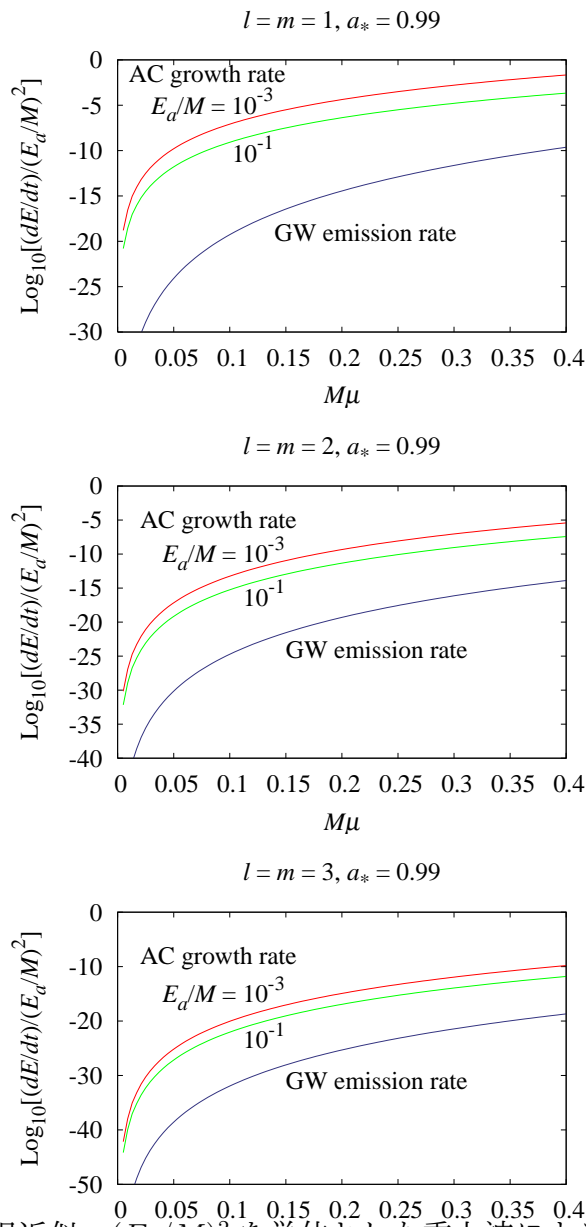


図 8.16: 平坦近似: $(E_a/M)^2$ を単位とした重力波によるエネルギー放出率とアクシオン増幅反射不安定成長率の比較. $\ell = m = 1, 2, 3, n_r = 0, a_* = 0.99$.

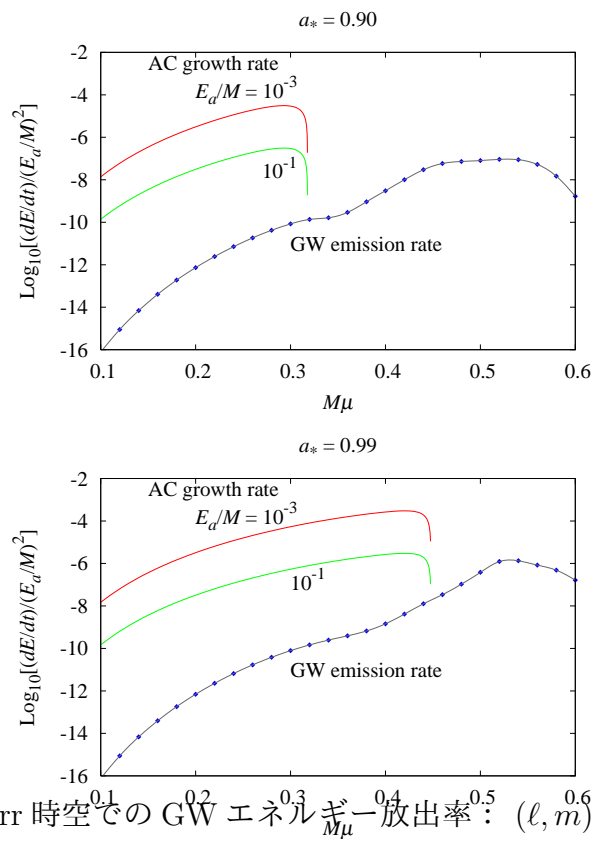


図 8.17: Kerr 時空での GW エネルギー放出率: $(\ell, m) = (1, 1)$. $a_* = 0.90, 0.99$. $\tilde{\ell} = 2, 3, 4, 5$.

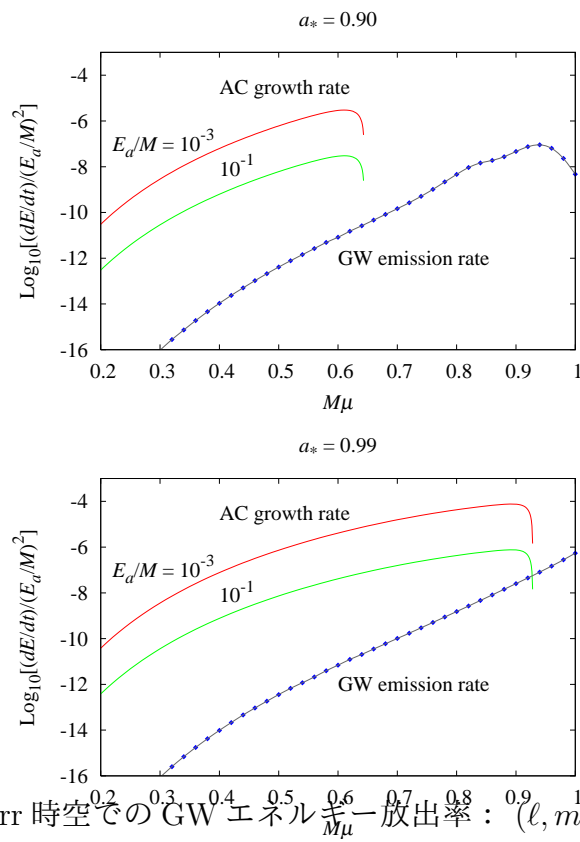


図 8.18: Kerr 時空での GW エネルギー放出率: $(\ell, m) = (2, 2)$. $a_* = 0.90, 0.99$. $\tilde{\ell} = 4, 5, 6, 7$.

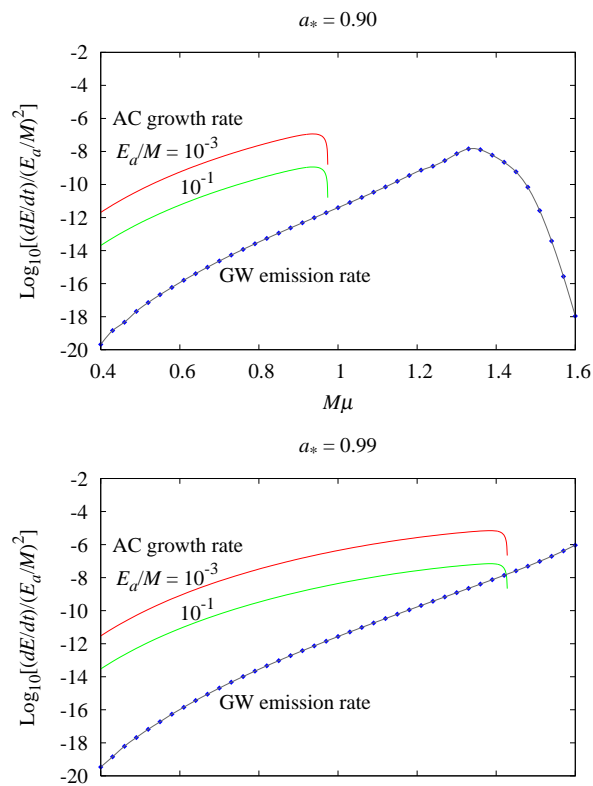


図 8.19: Kerr 時空での GW エネルギー放出率: $(\ell, m) = (3, 3)$. $a_* = 0.90, 0.99$. $\tilde{\ell} = 6, 7, 8, 9$.

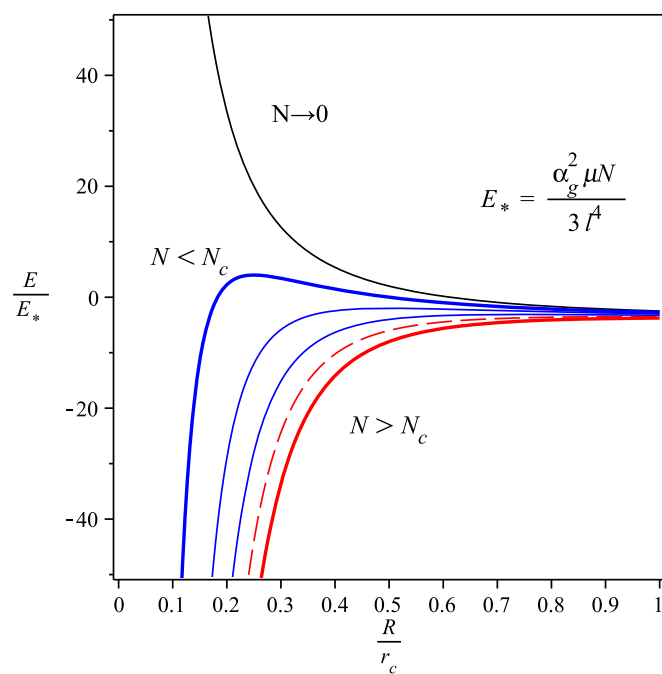


図 8.20: アクシオン雲のエネルギーのサイズ R 依存性

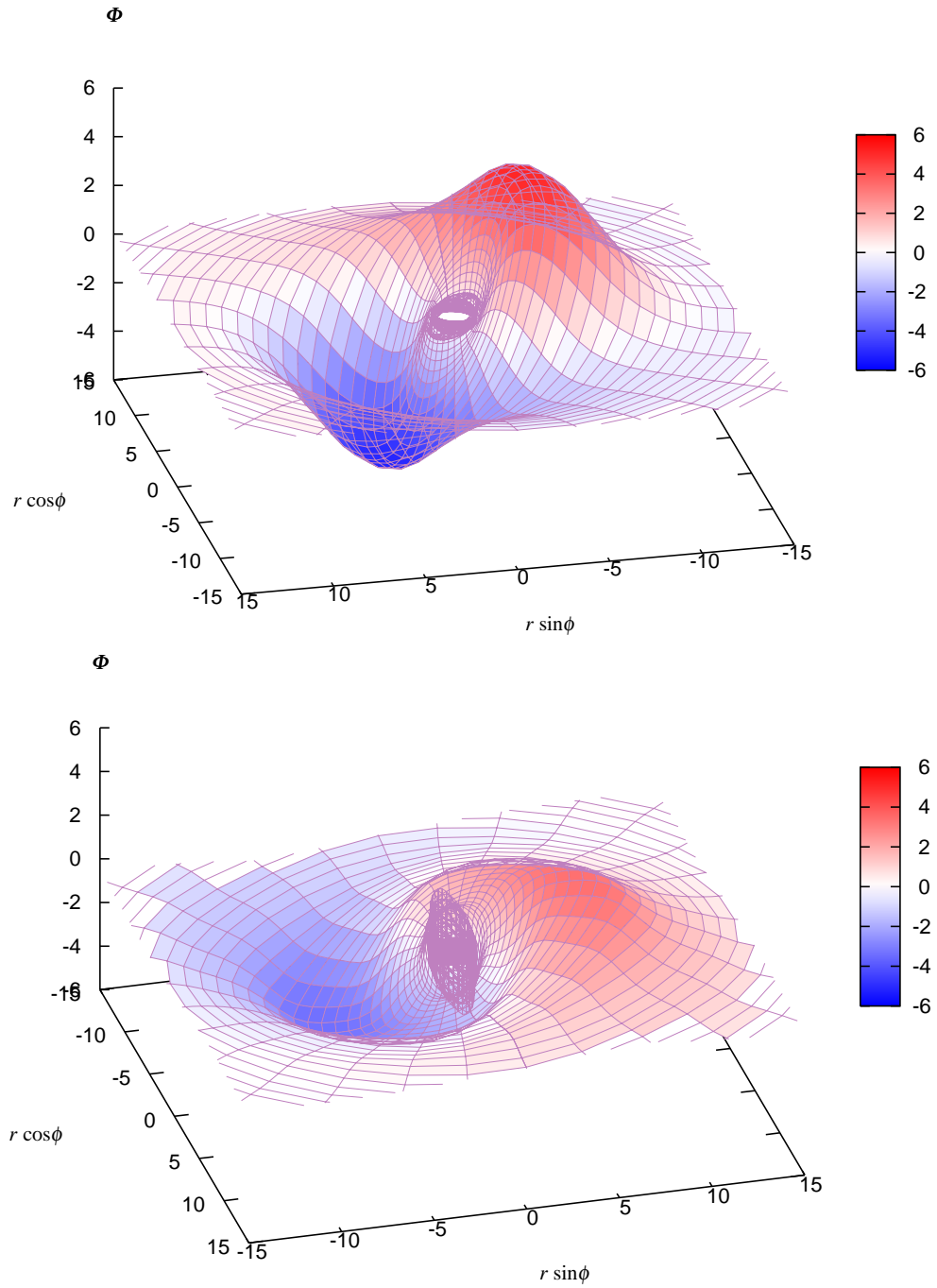


図 8.21: 数値シミュレーションにおけるボーズノバ現象のスナップショット (上は起きる前, 下は起きた直後)

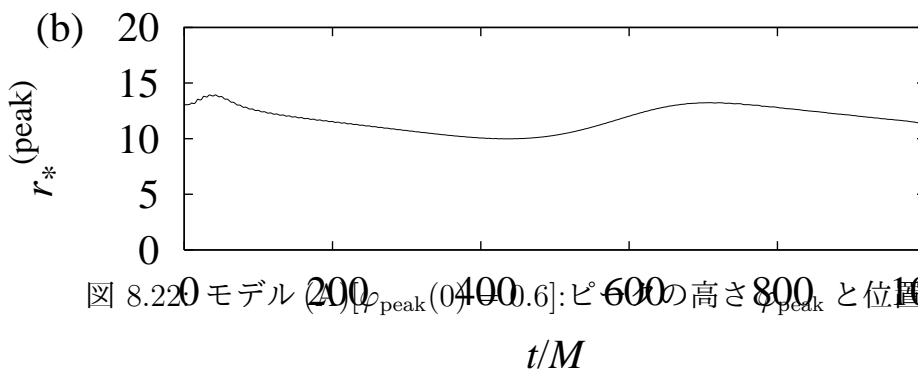
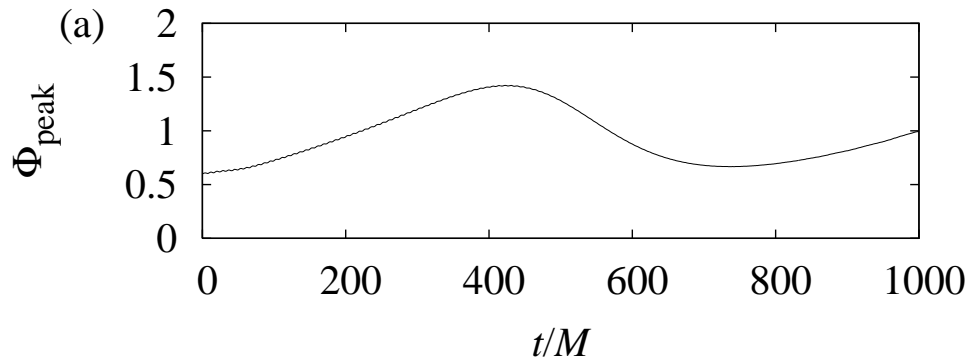


図 8.22: モデル (A) の $\Phi_{\text{peak}}(0) = 0.6$ 、 $r_{* \text{peak}}(0) = 14$ の高さ 800 と位置 1000 の振る舞い.

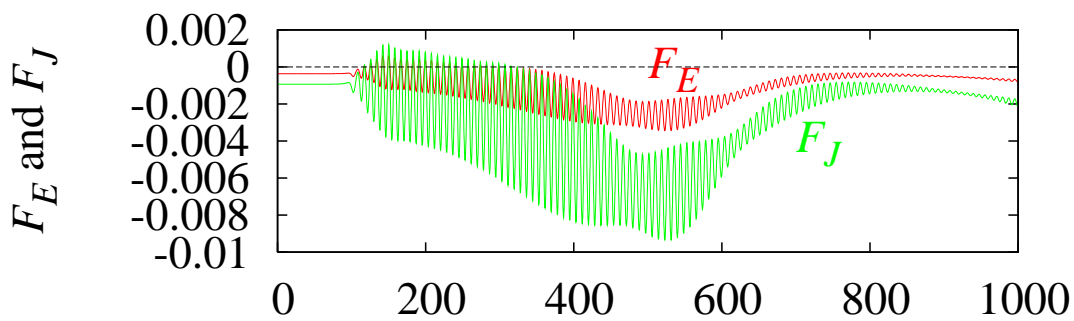
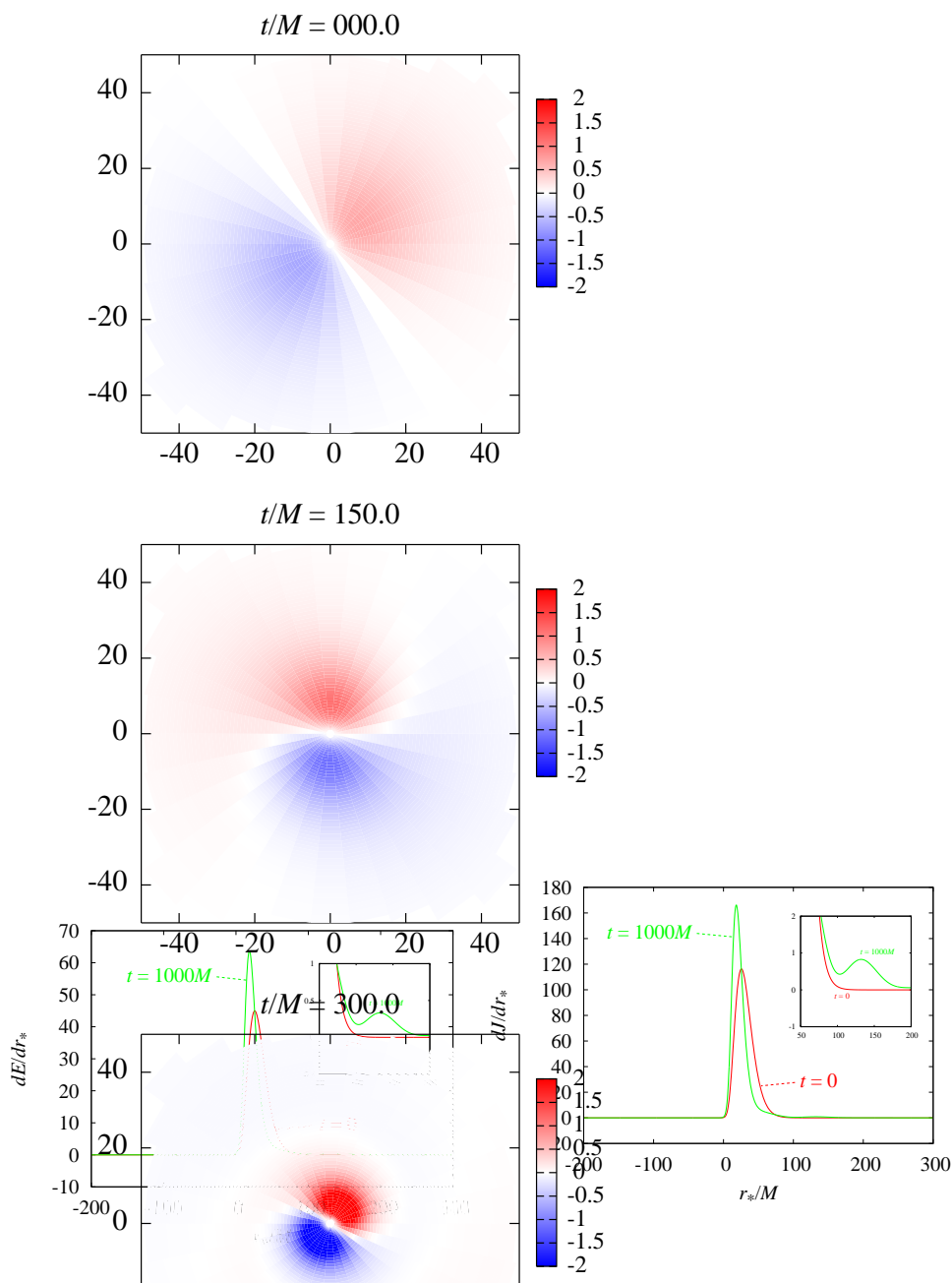


図 8.23: モデル (A): BH ホライズンに落ち込むエネルギーフラックス F_E と角運動量フラックス F_J . 非線形効果はBHからのエネルギーと角運動量の取り出しを増大させる.

図 8.24: モデル (A) : $t/M = 0$ および 1000 におけるエネルギー密度 dE/dr_* (左) と角運動量密度 dJ/dr_* (右).



第8章 Black

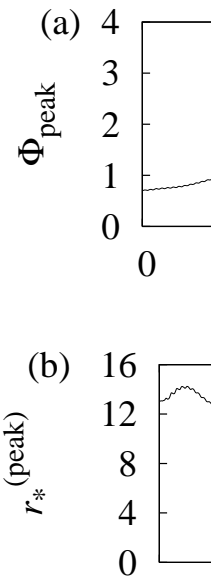


図 8.26: モデル A に非常に大きなノバが起きる。

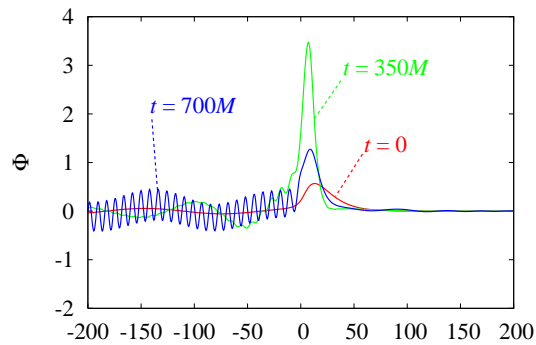


図 8.27: モデル (B): $t = 500M$ での赤道面 ($(r_*/M, \phi)$ 座標系) でのスナップショット (左) と $t/M = 0, 350, 700$ における赤道面の $\phi = 0$ 線上の場の値。

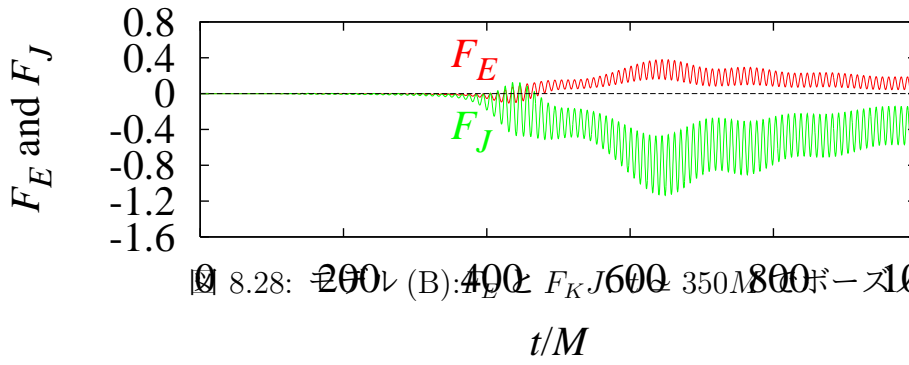


図 8.28: モデル (B): F_E と F_J の時間発展. $t/M = 0, 200, 400, 600, 800, 1000$ の場合を示す.

図 8.29: モデル (B): dE/dr_* (左) と dJ/dr_* (右). $t/M = 0, 750, 1500$

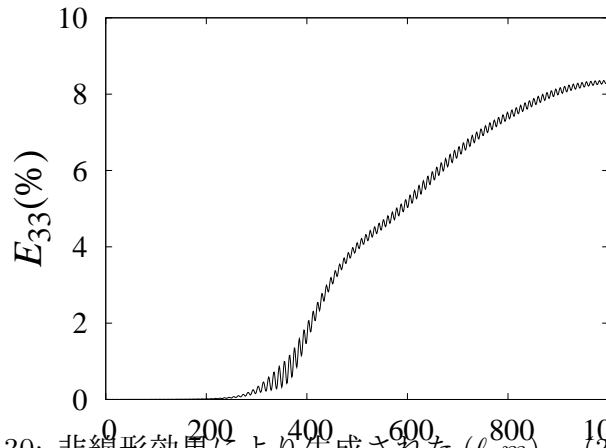


図 8.30: 非線形効果により生成された $(\ell, m) = (3, \pm 3)$ モードのエネルギー E_{33} が全エネルギーに占める割合の時間変化.

図 8.31: アクシオン場の振幅の時間発展に対する 2つの可能性.

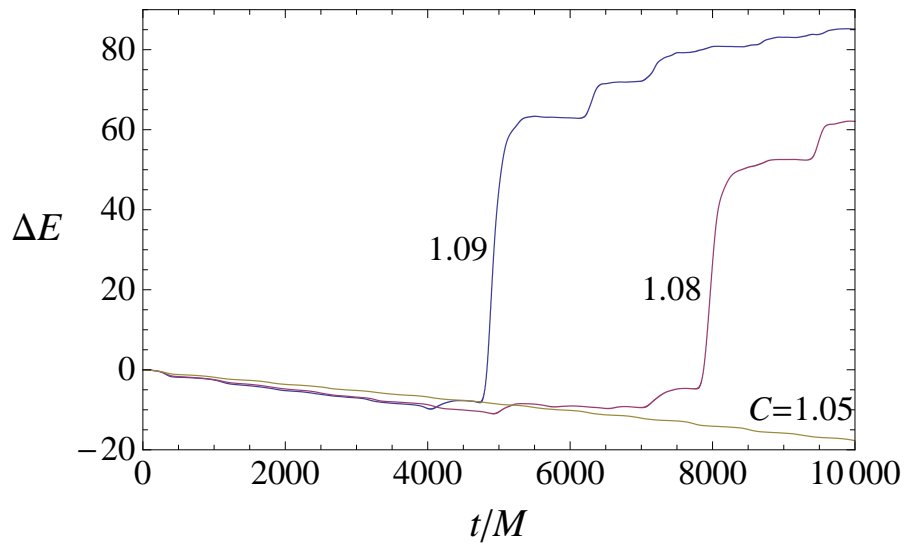


図 8.32: BH に吸収された全エネルギー ΔE の時間変化. $C = 1.05, 1.08, 1.09$

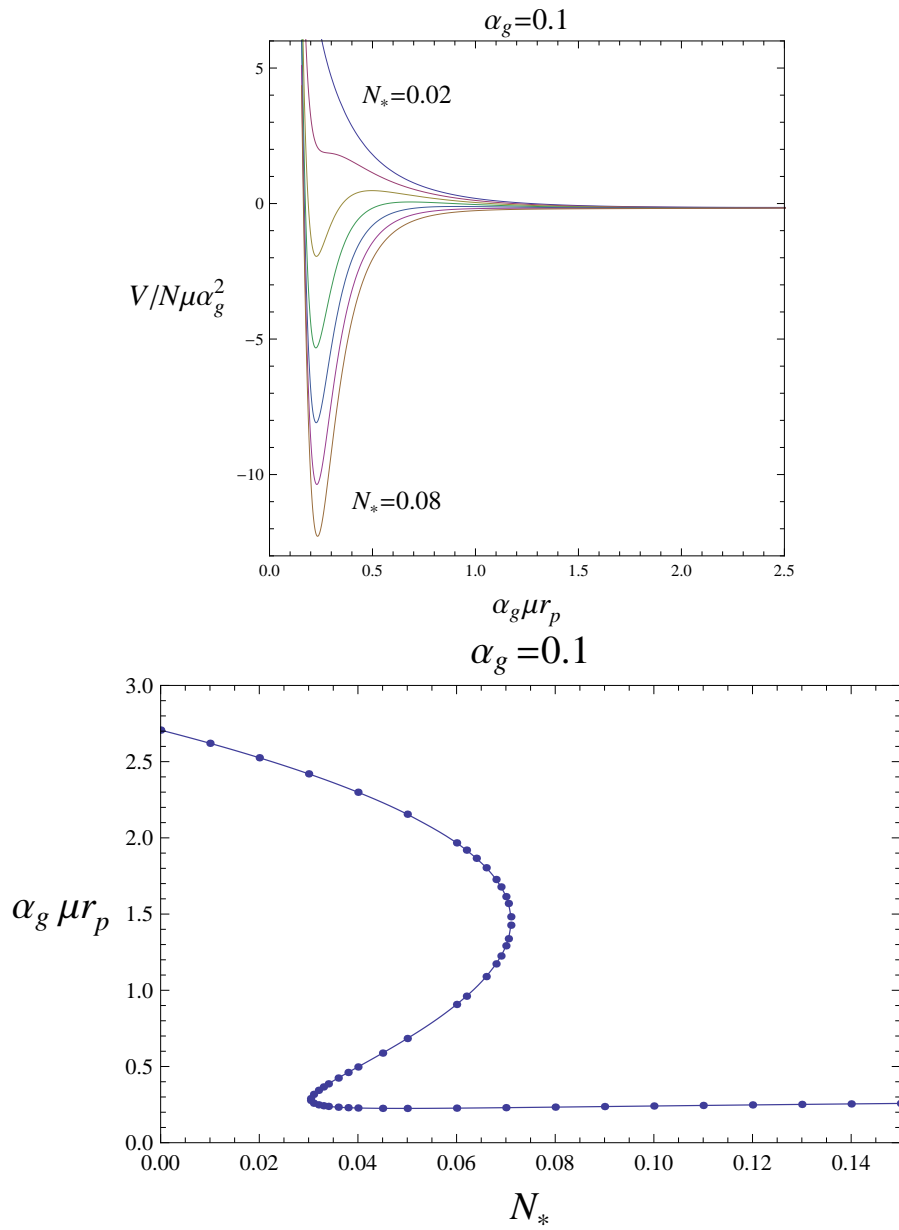


図 8.33: $\alpha_g = 0.1$: $\alpha_g\mu r_p$ の関数としての有効ポテンシャル V (上) とポテンシャルの臨界点 (下) のパラメータ N_* への依存性 $N_* = 0.02, \dots, 0.08$ で 0.01 刻み.

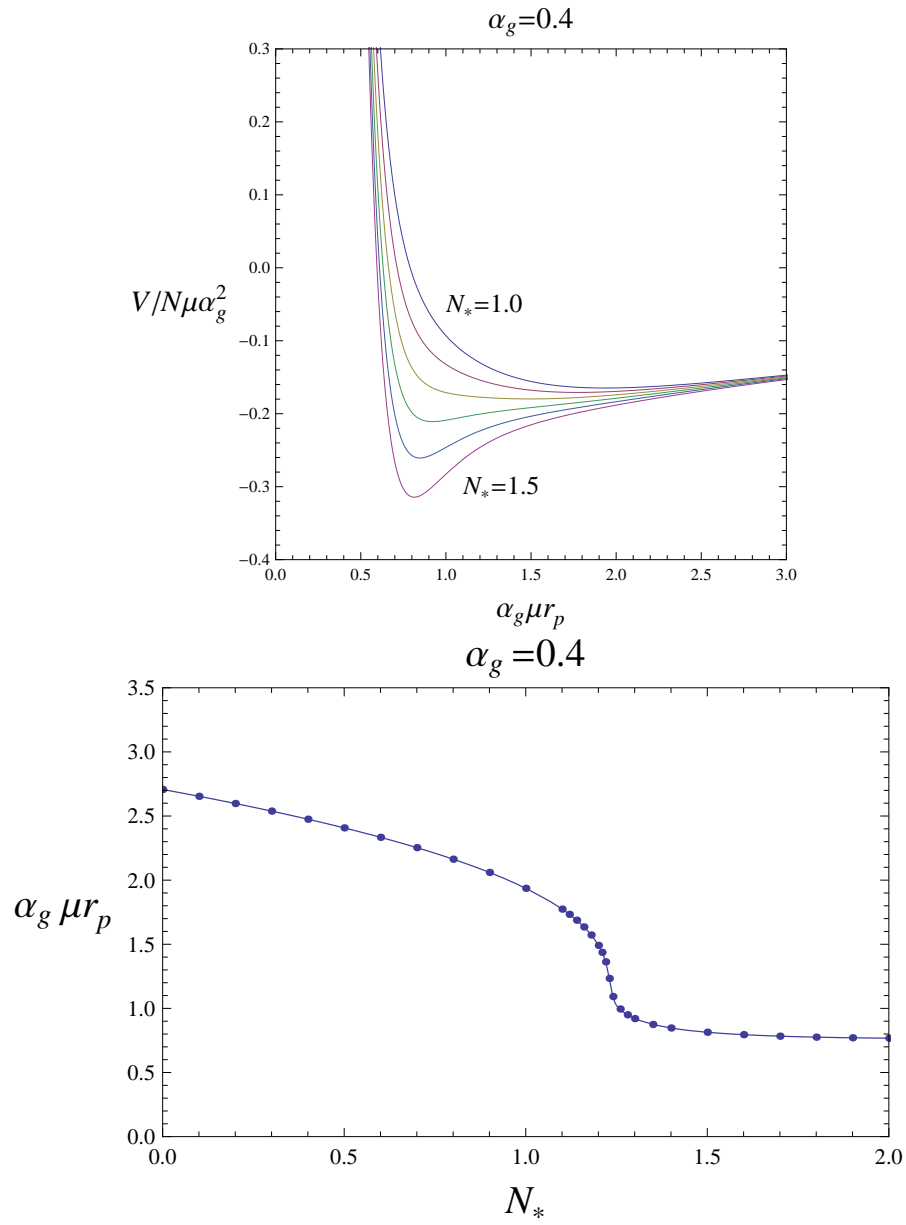


図 8.34: $\alpha_g = 0.4$: $\alpha_g\mu r_p$ の関数としての有効ポテンシャル V (上) とポテンシャルの臨界点 (下) のパラメータ N_* への依存性 $N_* = 1.0, \dots, 1.5$ で 0.1 刻み.

9

Superstring theory

§9.1

***Universal axion (model-independent axion)**

§9.2

***Form field axions (model-dependent axions)**

§9.3

***Gauge anomaly and CS coupling**

§9.4

Examples

9.4.1 References

- Superstring axions
 - P. Svrček and E. Witten:
JHEP 06 (2006) 051 [hep-th/0605206]
“Axions In String Theory”
 - J.P. Conlon:
JHEP 05 (2006) 078 [hep-th/0602233]
“The QCD axion and moduli stabilisation”
 - K. Choi and K.S. Jeong:
JHEP 01 (2007) 103 [hep-th/0611279]
“String theoretic QCD axion with stabilized saxion and the pattern of supersymmetry breaking”
 - A. Arvanitaki, S. Dimopoulos, S. Dubovsky, N. Kaloper and J. March-Russell:
Phys. Rev. D 81 (2010) 123530 [arXiv:0905.4720]
“String Axiverse”
 - B.S. Acharya, K. Bobkov and P. Kumar:
JHEP 11 (2010) 105 [arXiv:1004.5138]
“An M-theory Solution to the Strong CP Problem and Constraints on the Axiverse”
 - T. Higaki and T. Kobayashi:
Phys. Rev. D 84 (2011) 045021 [arXiv:1106.1293]
“Note on moduli stabilization, supersymmetry breaking and axiverse”
 - M. Cicoli, M. Goodsell and A. Ringwald:
JHEP 10 (2012) 146 [arXiv:1206.0819]
“The type IIB string axiverse and its low-energy phenomenology”
 - M. Cicoli, S. de Alwis and A. Westphal: arXiv:1304.1809 “Heterotic Moduli Stabilization”
- Large Volume compactification Scenario

- V. Balasubramanian, P. Berglund, J.P. Conlon and F. Quevedo:
JHEP 03 (2005) 007 [hep-th/0502058]
“Systematics of moduli stabilisation in Calabi-Yau flux compactifications”
- J.P. Conlon, F. Quevedo and K. Suruliz:
JHEP 08 (2005) 007 [hep-th/0505076]
“Large-volume flux compactifications: Moduli spectrum and D3/D7 soft supersymmetry breaking”
- R. Blumenhagen, J. Conlon, S. Krippendorf, S. Moster and F. Quevedo:
JHEP 09 (2009) 007 [arXiv:0906.3297]
“SUSY Breaking in Local String/F-Theory Models”
- Decay of Moduli/saxion into string axion/QCD axion
 - E. Chun and A. Lukas:
Phys. Lett. B 357 (1995) 43[hep-ph/9503233]
“Axino mass in supergravity models”
 - Moduli \rightarrow 2 axions dominantly in LVC:
T. Higaki, K. Kamada and F. Takahashi;
JHEP 09 (2012) 043 [arXiv:1207.2771]
“Higgs, Moduli Problem, Baryogenesis and Large Volume Compactifications”
 - M. Cicoli, J.P. Conlon and F. Quevedo:
Phys. Rev. D 87 (2013) 043520 [arXiv:1208.3562]
“Dark Radiation in LARGE Volume Models”
 - T. Higaki and F. Takahashi:
JHEP 11 (2012) 125 [arXiv:1208.3563]
“Dark Radiation and Dark Matter in Large Volume Compactifications”
- Axion abundance by the decay of saxions
 - K. Choi, E.J. Chun and J.E. Kim:
Phys. Lett. B 403 (1997) 209 [hep-ph/9608222]
“Cosmological implications of radiatively generated axion scale”
 - E.J. Chun, D. Comelli and D.H. Lyth:
Phys. Rev. D 62 (2000) 095013 [hep-ph/0008133]
“The Abundance of relativistic axions in a flaton model of Peccei-Quinn symmetry”

- K. Ichikawa, M. Kawasaki, K. Nakayama, M. Senami and F. Takahashi:
JCAP 05 (2007) 008 [hep-ph/0703034]
“Increasing effective number of neutrinos by decaying particles”
- K.S. Jeong and F. Takahashi:
JHEP 08 (2012) 017 [arXiv:1201.4816]
“Light Higgsino from Axion Dark Radiation”
- K. Choi, K.-Y. Choi and C.S. Shin:
Phys. Rev. D 86 (2012) 083529 [arXiv:1208.2496]
“Dark radiation and small-scale structure problems with decaying particles”
- P. Graf and F.D. Steffen:
JCAP 02 (2013) 018 [arXiv:1208.2951]
“Axions and saxions from the primordial supersymmetric plasma and extra radiation signatures”
- K.J. Bae, H. Baer and A. Lessa:
JCAP 04 (2013) 041 [arXiv:1301.7428]
“Dark Radiation Constraints on Mixed Axion/Neutralino Dark Matter”
- K.S. Jeong and F. Takahashi:
JHEP 04 (2013) 121 [arXiv:1302.1486]
“Axionic Co-genesis of Baryon, Dark Matter and Dark Radiation”

A

Lie代数に関連した諸定義と公式

§A.1

SU(3)

Lie代数

$$[e_a, e_b] = f_{abc}e_c, \quad (\text{A.1.1})$$

$$f_{abc} = f_{[abc]}. \quad (\text{A.1.2})$$

ここで,

$$f_{123} = 1, \quad (\text{A.1.3a})$$

$$f_{147} = -f_{156} = f_{246} = f_{257} = f_{345} = -f_{367} = \frac{1}{2}, \quad (\text{A.1.3b})$$

$$f_{458} = f_{678}. \quad (\text{A.1.3c})$$

Adjoint 表現

$$(ad(e_a))^b{}_c = f_{bac}. \quad (\text{A.1.4})$$

対応する Killing 形式は

$$K(e_a, e_b) := \text{Tr}_{\text{adj}}(e_a e_b) = -3\delta_{ab}. \quad (\text{A.1.5})$$

ベクトル表現 $e_a = -i\lambda_a/2$ とおくと、

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, & \lambda_2 &= \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, & \lambda_3 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\
 \lambda_4 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, & \lambda_5 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}, & \lambda_6 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \\
 \lambda_7 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}, & \lambda_8 &= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}.
 \end{aligned} \tag{A.1.6}$$

これらに対して、

$$\mathrm{Tr}_v(\lambda_a \lambda_b) = 2\delta_{ab}. \tag{A.1.7}$$

B

特性類と指数定理

§B.1

特性類

一般に, $GL(k, \mathbb{C})$ の多項式関数 $P(\alpha)$ が, $GL(k, \mathbb{C})$ の部分群 G の作用

$$\text{ad}(g) : \alpha \mapsto g\alpha g^{-1} \quad (\text{B.1.1})$$

に対して不変であるとき, P を G -特性多項式と呼ぶ.

一般に, $P(\alpha)$ を G -特性多項式とするとき, G を構造群とする多様体 M 上の k 次元ベクトルバンドル (係数体は \mathbb{R} ないし \mathbb{C}) V の線形 G 接続 (Ω, ω) に対して, $P(\Omega)$ は次の性質をもつ:

- i) ゲージ不変な閉微分形式.
- ii) 対応するコホモロジー類は, 接続 Ω に依存せず, バンドル構造のみで決まる.

B.1.1 Euler 類

E を多様体 M 上の向き付けられた $2p$ 次元実ベクトルバンドル, Ω^{ij} をその計量に関する線形接続の曲率形式とすると, E の Euler 類は

$$e(E) = \frac{1}{2^{2p} \pi^p p!} \sum \epsilon_{i_1 \dots i_{2p}} \Omega^{i_1 i_2} \wedge \dots \wedge \Omega^{i_{2p-1} i_{2p}} \quad (\text{B.1.2})$$

により与えられる.

【例 B.1.1 ($T(S^2)$)】 2次元球面

$$ds^2 = A^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \quad (\text{B.1.3})$$

に対して, 直交基底

$$\theta^1 = A d\theta, \quad \theta^2 = A \sin \theta d\phi \quad (\text{B.1.4})$$

に対する接続形式は,

$$\omega = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \chi, \quad \chi = -\cos \theta d\phi. \quad (\text{B.1.5})$$

曲率形式は

$$\mathcal{R} = d\omega = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} d\chi, \quad (\text{B.1.6})$$

$$d\chi = \theta^1 \wedge \theta^2. \quad (\text{B.1.7})$$

よって, Euler 類は

$$e(T(S^2)) = \frac{1}{2\pi} \theta^1 \wedge \theta^2. \quad (\text{B.1.8})$$

これより,

$$\chi(S^2) = \int_{S^2} e(T(S^2)) = 2. \quad (\text{B.1.9})$$

□

B.1.2 Chern 類

E を多様体 M 上の p 次元複素ベクトルバンドル, Ω をその計量に関する線形接続の反 Hermite な曲率形式とすると, E の全 Chern 類は

$$c(E) = \det \left(1 + \frac{i\Omega}{2\pi} \right) = 1 + c_1(E) + \cdots + c_p(E) \quad (\text{B.1.10})$$

で与えられる. ただし,

$$c_j(E) \in H^{2j}(M, \mathbb{Z}). \quad (\text{B.1.11})$$

特に,

$$c_1(E) = \frac{i}{2\pi} \text{Tr} \Omega, \quad (\text{B.1.12a})$$

$$c_2(E) = \frac{1}{8\pi^2} (\text{Tr} \Omega^2 - (\text{Tr} \Omega)^2), \quad (\text{B.1.12b})$$

$$c_p(E) = e(E_{\mathbb{R}}). \quad (\text{B.1.12c})$$

また,

$$\text{ch}(\Omega) = \text{Tr} e^{i\Omega/2\pi} = p + c_1(\Omega) + \cdots \quad (\text{B.1.13})$$

を Chern 特性形式という.

【例 B.1.2 ($T(\mathbb{C}P^1)$)】 $\mathbb{C}P^1$ の標準計量 ($[x : 1] \in \mathbb{C}P^1$)

$$ds^2 = \phi \bar{\phi}; \quad \phi = 2A \frac{dz}{|z|_1^2} \quad (\text{B.1.14})$$

(本来の Fubini-Study 計量では $A = 1$) に対して,

$$d\phi = -\chi \wedge \phi, \quad \bar{\chi} = -\chi \quad (\text{B.1.15})$$

より U(1) 接続形式は

$$\chi = \frac{zd\bar{z} - \bar{z}dz}{|z|^2 + 1}. \quad (\text{B.1.16})$$

よって, 曲率形式は

$$F = d\chi = \frac{2}{(|z|^2 + 1)^2} dz \wedge d\bar{z}. \quad (\text{B.1.17})$$

Chern 類は

$$c_1 = i \frac{F}{2\pi} \Rightarrow \int_{\mathbb{C}P^1} c_1 = 2. \quad (\text{B.1.18})$$

□

B.1.3 Pontrjagin 類

E を多様体 M 上の向き付けられた k 次元実ベクトルバンドル, Ω^{ij} をその計量に関する線形接続の曲率形式とすると, E の Pontrjagin 類は

$$P(E) = \det \left(1 - \frac{\Omega}{2\pi} \right) = 1 + p_1(E) + \cdots + p_{[k/2]}(E) \quad (\text{B.1.19})$$

ただし,

$$p_j(E) = (-1)^j c_{2j}(E \otimes \mathbb{C}) \in H^{4j}(M, \mathbb{Z}). \quad (\text{B.1.20})$$

また, $k = 2m$ のとき,

$$p_m(E) = e(E)^2. \quad (\text{B.1.21})$$

接続形式 Ω を

$$\frac{\Omega}{2\pi} = \left[\begin{pmatrix} 0 & x_1 \\ -x_1 & 0 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} 0 & x_{2r} \\ -x_{2r} & 0 \end{pmatrix} \right] \quad (\text{B.1.22})$$

と標準化すると,

$$p_1(E) = \sum_a x_a^2, \quad (\text{B.1.23a})$$

$$p_2(E) = \sum_{ab} x_a^2 x_b^2 \quad (\text{B.1.23b})$$

接続 Ω の A-roof 種数を

$$\hat{A}(\Omega) = \prod_a \frac{x_a/2}{\sinh(x_a/2)} = 1 - \frac{p_1}{24} + \frac{1}{16} \left(\frac{7p_1^2}{360} - \frac{p_2}{90} \right) \cdots \quad (\text{B.1.24})$$

で定義する. また, Hirzebruch L-多項式を

$$L(\Omega) = \prod_a \frac{x_a/2}{\tanh(x_a/2)} = 1 + \frac{p_1}{3} + \frac{1}{45} (7p_2 - p_1^2) \cdots \quad (\text{B.1.25})$$

により定義する.

§B.2

指数定理

B.2.1 一般 Atiyah-Singer 指数定理

$2n$ 次元のスピンド様体のスピノールバンドルを \mathcal{S} , ゲージ群 G に関するベクトルバンドルを E とする. このとき, \mathcal{S} のスピノール接続 (R, ω) と E のゲージ場 (F, A) により, バンドル $\mathcal{S} \otimes E$ の接続が定義され, 対応して, Dirac 作用素

$$\mathcal{D} = \gamma^\mu D_\mu : \mathcal{S} \otimes E \rightarrow \mathcal{S} \otimes E \quad (\text{B.2.1})$$

が定義される. このゼロモードの右巻き成分の数を n_+ , 左巻き成分の数を n_- とするとき,

$$n_+ - n_- = \int_M \left[\text{ch}(F) \hat{A}(R) \right]_{2n}. \quad (\text{B.2.2})$$

関連図書

- [1] Arvanitaki, A., Dimopoulos, A., Dubovsky, S., Kaloper, N. and March-Russell, J.: String Axiverse, *Phys. Rev. D* **81**, 123530 (2010).
- [2] Arvanitaki, A. and Dubovsky, S.: Exploring the string axiverse with precision black hole physics, *Phys. Rev. D* **83**, 044026 (2011).
- [3] Bond, J. and Efstathiou, G.: Cosmic background radiation anisotropies in universes dominated by nonbaryonic dark matter, *Astrophys. J. Lett.* **285**, 45–48 (1984).
- [4] Cardoso, V., Dias, O., Lemos, J. and Yoshida, S.: The Black hole bomb and superradiant instabilities (Erratum: Phys. Rev. D70:049903, 2004), *Phys. Rev. D* **70**, 044039 (2004).
- [5] Cardoso, V., Dias, O. and Yoshida, S.: Classical instability of Kerr-AdS black holes and the issue of final state, *Phys. Rev. D* **74**, 044008 (2006).
- [6] Cardoso, V. and Yoshida, S.: Superradiant instabilities of rotating black branes and strings, *JHEP* **0507**, 009 (2005).
- [7] Damour, T., Deruelle, N. and Ruffini, R.: *Nuovo Cimento Lett.* **15**, 257 (1976).
- [8] Detweiler, S.: Klein-Gordon Equation And Rotating Black Holes., *Phys. Rev. D* **22**, 2323–6 (1980).
- [9] Dolan, S.: Instability of the massive Klein-Gordon field on the Kerr spacetime, *Phys. Rev. D* **76**, 084001 (2007).
- [10] Douglas, M. and Kachru, S.: Flux Compactification, *Rev. Mod. Phys.* **79**, 733–96 (2007).

- [11] Fradkin, E. and Tseytlin, A.: Nonlinear Electrodynamics from Quantized Strings., *Phys. Lett. B* **163**, 123 (1985).
- [12] Hawking, S. and Ellis, G.: *The Large Scale Structure of Space-time*, Cambridge Univ. Press, Cambridge (1973).
- [13] Kodama, H.: Superradiance and Instability of Black Holes, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **172**, 11–20 (2008).
- [14] Kodama, H., Konoplya, R. and A, Z.: Gravitational stability of simply rotating Myers-Perry black holes: Tensorial perturbations., *Phys. Rev. D* **81**, 044007 (2010).
- [15] Kosowsky, A.: Cosmic Microwave Background Polarization, *Annals of Physics* **246**, 49–85 (1996).
- [16] Kreuzer, M.: Toric Geometry and Calabi-Yau Compactifications, *Ukr. J. Phys.* **55**, 613 (2010).
- [17] Leaver, E.: An analytic representation for the quasi-normal modes of Kerr black holes, *Proc. R. Soc. London A* **402**, 285 (1985).
- [18] Penrose, R. and Floyd, R. M.: Extraction of rotational energy from a black hole, *Nature* **229**, 177–179 (1971).
- [19] Polchinski, J.: *String Theory*, Cambridge Univ. Press (1998).
- [20] Press, W. and Teukolsky, S.: *Nature* **238**, 211 (1972).
- [21] Rosa, J.: The Extremal black hole bomb., *JHEP* **1006**, 015 (2010).
- [22] Svrcek, P. and Witten, E.: Axions In String Theory, *JHEP* **0606**, 051 (2006).
- [23] Yoshino, H. and Kodama, H.: Bosenova collapse of axion cloud around a rotating black hole, *Prog. Theor. Phys.* **128**, 153 (2012).
- [24] Zel'dovich, Y.: *Sov. Phys. JETP Lett.* **14**, 180 (1971).
- [25] Zouros, T. and Eardley, D.: Instabilities Of Massive Scalar Perturbations Of A Rotating Black Hole., *Ann. Phys.* **118**, 139–55 (1979).