

修士論文

準平行光子衝突系における  
sub-eV スカラー場共鳴の試験的探索

広島大学理学研究科物理科学専攻  
クォーク物理学研究室  
M124356

久米 一輝

指導教官 杉立 徹 教授  
主査 志垣 賢太 准教授  
副査 大川 正典 教授

平成 26 年 2 月 10 日

# 要旨

遠方の超新星爆発の観測や宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎの観測結果から、負の圧力を持つ暗黒エネルギーの存在が示唆されている。宇宙の全エネルギー密度の約7割が暗黒エネルギーで満たされており、その起源の解明は現代物理学の重要課題と言える。候補の1つとして、ディラトンと呼ばれるスカラー場が挙げられる。このディラトンはスケール対称性が自発的に破れることにより発生し、ディラトンが物質場と結合することにより宇宙項が時間と共に減衰するというシナリオが得られる。このシナリオにより、宇宙項の理論値と観測値の差が120桁も違うという問題を解決できる。[Y.Fujii and K.Maeda. The Scalar-Tensor Theory of Gravitation Cambridge Univ.Press(2003)]

本研究の目的は、sub-eV スカラー場の本格的探索を可能にするためのデータ測定系と解析手法の基盤を構築することである。微弱な信号を逃さないために、約10kHz という高頻度で波形データを記録し、1光子を計数できるような波形解析手法を確立した。

本実験では2色のレーザーを用い、各レーザーはスカラー場を生成する生成レーザー ( $1\omega$ ) とスカラー場の崩壊を誘導する誘導レーザー ( $u\omega$ ) に分類される。準平行光子衝突系では、レーザーを集光することで低い重心系エネルギーでの光子衝突を実現し、低質量場の共鳴状態をつくることが可能である。信号光は  $1\omega + 1\omega \rightarrow (2-u)\omega + u\omega$  の過程を通じて発生し、 $(2-u)\omega$  のエネルギーを持つ。生成レーザーとして波長532nm, ピークパワー0.2  $\mu$  J/0.75ns のパルスレーザー、誘導レーザーとして波長633nm, 2mW の連続光 (CW) レーザーを用いて実験を行い、約  $10^9$  事象を解析し信号光量を計数した。各事象を生成・誘導レーザーの有無によって4種類に場合分けし、各場合の光子数から実際の信号光量を見積もることが可能である (図1)。信号光は有意に観測されず、光子と結合する粒子の質量と結合定数に関する上限値を得た。

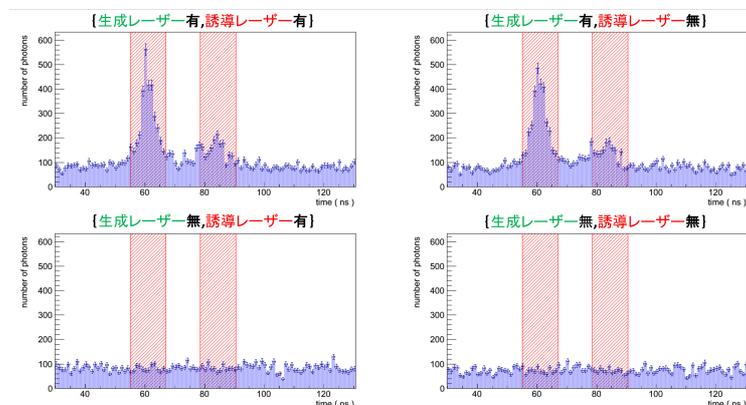


図1 事象をトリガー毎に分類し、全事象から計数した光子の時間分布を示す。生成レーザー有で見られるピーク構造は、レーザーの残余光子である。赤斜線部は信号光が期待できる時間を示し、各光子の数から信号光を計算する。

# 目次

第 1 章	序論	5
1.1	暗黒物質・暗黒エネルギー	5
1.2	スカラーテンソル理論 (STT)	7
第 2 章	研究動機・目的	9
第 3 章	測定原理	10
3.1	準平行光子衝突系	10
3.2	共鳴状態を含むことでの増大効果	11
3.3	真空内四光波混合	12
3.4	バックグラウンド	14
3.5	信号光とレーザーの偏光関係	16
3.6	スカラー場の質量と結合	16
第 4 章	実験概要	18
4.1	実験セットアップ	18
4.2	データ読み出し系	23
4.3	補正量の測定	24
第 5 章	解析手法	28
5.1	波形データ	28
5.2	波形解析	29
5.3	信号光子数の算出	33
第 6 章	解析結果	35
6.1	生成・誘導レーザー平均波形とパワー	35
6.2	トリガー毎の分類	36
6.3	レーザースタビリティ	37
6.4	補正量	38
6.5	信号光子数	40
6.6	スカラー場の質量と結合に対する上限値	41
第 7 章	結論と今後の展望	44

目次	4
第 8 章 謝辭	45
参考文献	46

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 暗黒物質・暗黒エネルギー

#### 1.1.1 宇宙の加速膨張

宇宙は現在膨張している。この事実は、1929年にエドウィン・ハッブルによって観測的に発見された。ここで次に問題視されたのが、どのような速さで膨張しているかであった。宇宙の膨張率を測定するには、ある天体までの距離とその天体が遠ざかる速度を測定すればよい。天体が遠ざかる速度は、光の「赤方偏移」で測定が可能である。赤方偏移とは、遠方天体からの光の波長が長くなる現象であり、光のドップラー効果として解釈される。

Ia型超新星は非常に明るいいため、90億光年程度離れていてもその観測が可能である。また、その特徴から明るさがそれほど変わらないため、明るさを測定することで距離の指標になりえる。実際には、単純に明るさを測るだけでは同程度の距離の超新星でもばらつきが生まれるので、光度曲線を測定して実際の明るさに補正する過程が必要である。

図 1.1 に遠方 Ia 型超新星の赤方偏移と明るさの観測結果をプロットしたハッブル図を示す。縦軸は天体の明るさを表していて、数字が大きくなるほど暗くなる。つまり、数字が大きいくほど距離が離れている。横軸は赤方偏移の大きさを表している。 $\Omega_M$  は物質密度、 $\Omega_\Lambda$  はエネルギー密度を表すパラメーターである。宇宙の空間曲率が 0 の場合、等速膨張は  $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (1, 0)$  の線であるが、それより上にずれると加速膨張、下にずれると減速膨張を表す。図 1.1 の赤い点はそれより上にずれており、つまり、宇宙は加速膨張しているということが分かった。最適なフィッティングの結果では  $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0.28, 0.72)$  であった [1]。

宇宙を加速膨張させるための斥力場のようなものは「暗黒エネルギー (dark energy)」と呼び、 $\Omega_\Lambda$  に相当する。

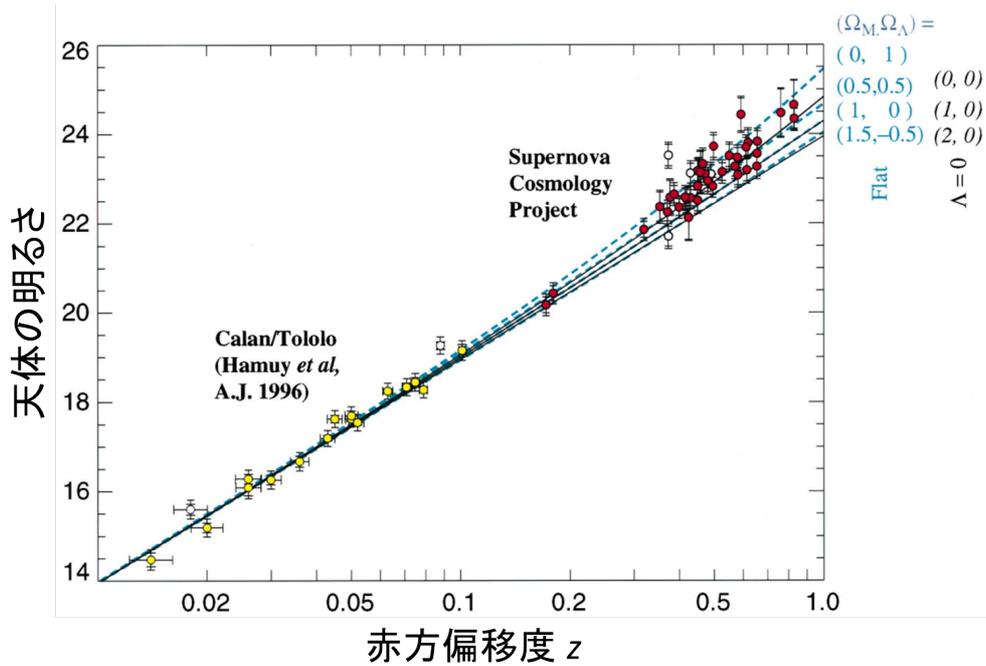


図 1.1 遠方 Ia 型超新星の赤方偏移と明るさの観測結果をプロットしたハッブル図

### 1.1.2 宇宙の組成

遠方の Ia 型超新星爆発の観測や宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎ観測から、現在の宇宙の組成が明らかになってきた。図 1.2 に宇宙の組成を示す。「暗黒物質 (dark matter)」とは、もともとは銀河の軌道速度を説明するために導入された未発見の質量物質を指す。図 1.2 を見て分かるように、宇宙のほとんどは未発見の物質で満たされている。暗黒物質・暗黒エネルギーの発見・解明は、現在の物理学における最重要課題と言っても過言ではない。

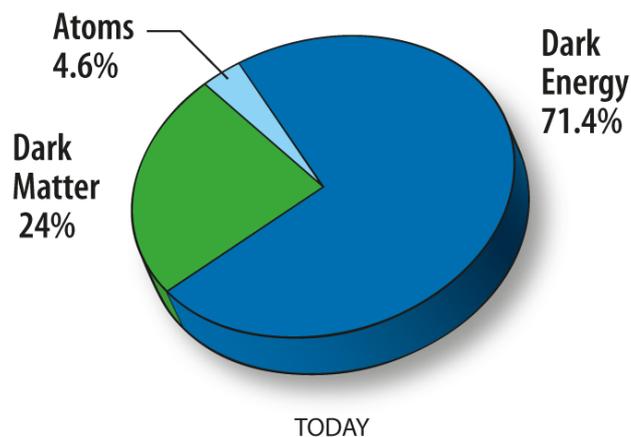


図 1.2 我々が観測できる物質は、全物質中の約 5% しかない。宇宙の約 9 割は、暗黒物質・暗黒エネルギーで満たされている。[2]

## 1.2 スカラーテンソル理論 (STT)

スカラーテンソル理論は、一般相対論に対する代替理論として注目を集めた。これはもともと、重力定数が時間変化する、という考えから出発した理論であり、次のラグランジアンから構築された [4]。

$$\mathcal{L} = \sqrt{-g} \left( \frac{1}{2} \xi \phi^2 R - \epsilon \frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi + L_{matter} - \Lambda \right) \quad (1.1)$$

$\phi$  はスカラー場を表し、右辺第2項はその運動エネルギー、 $R$  はスカラー曲率を示す。 $L_{matter}$  は一般相対論と同じ意味の物質を表す。 $\Lambda$  は宇宙項であり、もともとの STT にはなかった項だが、加速宇宙の説明のため付け加えておく。ここで重要なのは右辺第1項で、一般相対論では  $(16\pi G)^{-1}$  と定数となっている項が、STT では  $1/2\xi\phi^2$  という  $\phi$  の関数として扱われている。 $\xi\phi^2 = (8\pi G)^{-1}$  と置くと、一般相対論と同じ形になるが、このときの  $G$  は定数ではない。

共形変換を導入することで、 $G$  を定数にとれるような一般化した式へと変換できる。共形変換は、計量テンソル  $g_{\mu\nu}$  に対して

$$g_{\mu\nu} \rightarrow g_{*\mu\nu} = \Omega^2(x) g_{\mu\nu} \quad (1.2)$$

となるような変換である。ここで特に、 $\Omega^2 = \xi\phi^2$  と選ぶと、式 (1.1) は次のようになる [4]。

$$\mathcal{L} = \sqrt{-g_*} \left( \frac{1}{2} R_* - Sgn(\zeta^2) \frac{1}{2} g_*^{\mu\nu} \partial_\mu \sigma \partial_\nu \sigma + L_{*matter} - V(\sigma) \right) \quad (1.3)$$

このとき、右辺第1項は  $G_* = 1$  となるような定数となっていて、一般相対論に帰着している。この帰着は  $\Omega$  の選び方によるもので、つまりは、 $G$  が定数となるかどうかは  $\Omega$  の選び方次第といってもよい。この  $\Omega$  を選ぶことを、「共形枠を選ぶ」と呼ぶ。 $G$  が定数になるような共形枠を E 枠、 $G$  が変数であるような共形枠を J 枠と呼ぶことにする。より一般的に言えば、ある数が定数となるか変数となるかは、共形枠の取り方次第であるといってもよい。ここで、スカラー場は元来の  $\phi$  ではなく、次のように定義される  $\sigma$  となっていることに注意する。

$$\phi = \xi^{-1/2} e^{\zeta\sigma} = \xi^{-1/2} \Omega \quad (\zeta^{-2} = 6 + \epsilon\xi^{-1}) \quad (1.4)$$

式 (1.1) に宇宙項  $\Lambda$  を追加したが、この意味を具体的に解釈していく。まずは、宇宙のスケール係数  $a(t)$ 、スカラー場  $\phi(t)$ 、物質密度  $\rho(t)$  として、式 (1.1) から宇宙方程式を導く。このとき、J 枠では次のように求められる [4]。

$$a = const \quad (1.5)$$

$$\phi = \sqrt{\frac{4\Lambda}{6\xi + \epsilon}} t \quad (1.6)$$

$$\rho = -3\Lambda \frac{2\xi + \epsilon}{6\xi + \epsilon} \quad (1.7)$$

この結果では、 $a$  が定数となっているため膨張も収縮もしないような宇宙を表しているため、現在の観測結果と矛盾する。よって、我々は J 枠には住んでいないという結論となる。

次に E 枠で考えてみる。これについては、次のような共形変換を行う。

$$dt_* = \Omega dt \quad a_* = \Omega a \quad (1.8)$$

この変換を用いて式 (1.5),(1.6),(1.7) を書き直すと次のように得られる [4]。

$$a_* = t_*^{1/2} \quad (1.9)$$

$$\sigma = \bar{\sigma} + \frac{1}{2}\zeta^{-1} \ln t_* \quad (1.10)$$

$$\rho_\sigma = \frac{1}{2} \left( \frac{d\sigma}{dt_*} \right)^2 + V(\sigma) = \frac{3}{16} \zeta^{-2} t_*^{-2} \quad (1.11)$$

$$\rho_* = \frac{3}{4} \left( 1 - \frac{1}{4}\zeta^{-2} \right) t_*^{-2} \quad (1.12)$$

E 枠においては、宇宙は膨張する。さらに、 $t_*^{1/2}$  の振る舞いは輻射優勢の仮定から期待される通りであり、E 枠が我々が住んでいる共形枠であることを示唆している。 $\rho_\sigma$  はスカラー場の密度、つまりエネルギー密度を表しており、宇宙項  $\Lambda$  と対応した量である。これらが STT の宇宙論への帰結であるが、 $\rho_\sigma \sim \Lambda \propto t_*^{-2}$  は宇宙論において非常に重要な帰結となっている。

現在観測されているエネルギー密度は (1.1.1) 章にもあるが、臨界密度  $\rho_{cr}$  と宇宙項  $\Lambda_{obs}$  を用いて

$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\Lambda_{obs}}{\rho_{cr}} = 0.72 \quad (1.13)$$

と観測されている。臨界密度はハッブル定数  $H_0$  の測定値を用いて次のように書ける [5]。

$$M_P^{-1} \sqrt{\frac{\rho_{cr}}{3}} = H_0 = (0.73 \pm 0.03) \times 100 \text{ km/s/Mpc} \quad (1.14)$$

プランク単位系  $c = \hbar = M_P (= (8\pi G)^{-1/2}) = 1$ ,  $1 \text{ pc} = 3.09 \times 10^{16} \text{ m}$  を用いて計算すると  $\rho_{cr} \approx 1.22 \times 10^{-120}$  となり

$$\Lambda_{obs} \approx 0.89 \times 10^{-120} \quad (1.15)$$

を得る。一方、理論的な値として  $\Lambda_{th} \sim M_P^4 \sim 1$  と考えられてきた。このように、観測値と理論値では 120 桁もの不一致が生じている。これは、「微調整問題」と呼ばれている、現在の宇宙論における大きな問題である。

ところで、(1.15) の値は次のようにも解釈できる。それは、現在宇宙の年齢とされている  $t_0 \approx 10^{60.2}$  を用いて

$$\Lambda_{obs} \approx 2.23 t_0^{-2} \quad (1.16)$$

と書き表せることである。これは宇宙項が時間と共に減衰することを示している。

ここで、(1.11) と比較してみる。E 枠を共形枠として選んだとき、 $\rho_\sigma \sim \Lambda \propto t_*^{-2}$  という結果が得られた。これは、(1.16) の仮定と一致している。つまり E 枠を選ぶことで、微調整問題を解決できかつ現在の観測結果と矛盾しない宇宙が導かれているということである。

E 枠を選ぶ結果として、ヒッグス機構と同様、自発的対称性の破れが生じる。共形変換の一種にスケール変換があるが、ここで破れるのは大域的スケール不変性であり、このとき、ディラトンと呼ばれる質量 0 の南部ゴールドストーン粒子が生じる。ディラトンは自己相互作用することで、下限値  $10^{-9} \text{ eV}$  までのわずかな質量を獲得する。

この軽いスカラー場であるディラトンこそが暗黒エネルギー候補であり、その発見は宇宙論における大きな問題解決につながる [4],[5]。

## 第2章

# 研究動機・目的

超新星爆発の加速的膨張の観測や宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎの観測結果から、宇宙は平坦かつ加速膨張している事が分かった。宇宙を加速膨張させるための何らかのエネルギーは、「暗黒エネルギー」と呼ばれている。また、銀河系の軌道速度の観測結果から未知なる質量物質の存在が示唆され、その物質は「暗黒物質」と呼ばれている。現在では、宇宙の9割以上が暗黒物質・暗黒エネルギーで満たされていることが分かったが、未だにその解明には至っていない。現代物理学にとって、この未知なる暗黒場の解明は、最重要課題といっても過言ではない。

暗黒エネルギーの候補の一つとして、ディラトンと呼ばれる  $neV$  程度の質量を持ったスカラー場が挙げられる [4]。また、暗黒物質の候補の一つとして、量子色力学から予言されるアクシオン粒子がある [13]。2光子と結合するよく知られた(擬)スカラー粒子として、ヒッグス粒子や中性中間子が挙げられる。2つの粒子は約  $100GeV$ (ヒッグス粒子)と約  $100MeV$ (中性中間子)程度の質量を持つが、2光子と結合するという共通な性質を持ちながら、粒子の質量スケールでは3桁も離れているという点に注目してほしい。アクシオンやディラトンもまた、2光子と結合するとされている。これが示唆することは、桁違いに異なった質量スケールに光子と結合する未知な粒子が存在していても何ら不思議ではない、ということである。

本研究の目的は、2光子と結合する  $sub-eV$  スカラー場の本格的探索を可能にするために、データ測定系と解析手法の基盤を構築することである。データ測定系では、微弱な信号を逃さないために、高頻度で波形データを記録するような系の構築を目指し、解析手法では、波形データを存分に生かし、微弱な信号を逃さず精度のよい測定量を導くようなアルゴリズムの開発を目指した。

その構築した基盤検証のためにも、まずはゼロバックグラウンド環境下で膨大な統計量を測定し、それでもゼロ信号であると結論付けられるかどうかを検証することを目的とする。

## 第3章

# 結論と今後の展望

想定するバックグラウンドがほぼ0である環境下で実験を行い、真空度  $3.8 \times 10^{-4} Pa$  で測定された約  $10^9$  事象の統計量を解析したが、統計誤差の範囲内で、有意な信号は発見できなかった。この結果からスカラー場の質量と結合に対する棄却領域を信頼区間 95% で求めることに成功した。

信号が発見されなかったということは、スカラー場探索におけるデータ測定系と解析手法の基盤が構築できたといえる。今後、本研究で述べた「測定原理」、「解析手法」の基で、レーザー強度を上げていき、スカラー場の棄却領域を広げていくことが可能である。図 7.1 はより高強度レーザーシステムを用いた時に、具体的なスカラー場の棄却領域を示している。縦軸スケールが図 6.8 とは異なることに注意する。究極的な目標は、重力結合にまで感度を上げることであり、ファイバー束レーザー (ICAN) を用いれば重力結合感度の到達が見込まれる。

## 第4章

# 謝辞

本研究を行うにあたり、多くの指導をしていただいた本間先生には本当に感謝をしています。まだまだ未熟ではありますが、自分たちの力だけで実験の初めから終わりまでを一通り組み立てることができ、非常に良い勉強になりました。また本研究は、同研究室 M2 の長谷部君・G4 の松浦さん協力を得て、無事仕上げることができました。特に長谷部君とは、京都大学出張のときにも夜遅くまで共に実験をしました。至らないところもあって多々迷惑をかけたことと思います。申し訳ありません。それでも、ともに様々な苦難を乗り越えてきたことは、非常に良い経験になりました。また、出張先でお世話になった京都大学化学研究所の皆様、本当にありがとうございました。最後に、同研究室の皆様、楽しく有意義な三年間を過ごせました。ありがとうございました。

## 参考文献

- [1] "MEASUREMENTS OF  $\Omega$  AND  $\Lambda$  FROM 42 HIGH-REDSHIFT SUPERNOVAE" THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 517:565E586, 1999 June 1
- [2] <http://map.gsfc.nasa.gov/media/121236/index.html>
- [3] P. Jordan, *Schwerkraft und Weltall* (Friedrich Vieweg und Sohn), 1955.
- [4] Y.Fujii and K.Maeda, "The Scalar Tensor Theory of Gravitation" Cambridge Univ.Press (2003)
- [5] 藤井 保憲著,「基本定数の宇宙論的変動をめぐって」数理科学 2013年5月号.
- [6] B.De Tollis, *Nuovo Cimento* 35 (1965) 1182, *Nuovo Cimento* 32 (1964) 757
- [7] 猪木慶治・川合 光 "量子力学 II"
- [8] Kensuke Homma "Sensitivity to dark energy candidates by searching for four-wave mixing og high intensity lasers in the vacuum" Prog. Theor. Exp. Phys. 2012,04D004
- [9] <http://acqiris-jp.com/category/products/compact/compact-10bit/>
- [10] K. Ehret et al. (ALPS Collab.), Phys. Lett. B689, 149 (2010).
- [11] 近藤高志 "情報・ナノマテリアル光学 II"
- [12] K. Homma, PTEP 2012, 04D004 を基礎に、ルミノシティ - 補正係数の修正を施した関係式に基づく。
- [13] See the parametrization, for exmple, in the section AXIONS AND OTHER SIMILAR PARTICLES in 644 J. Beringer et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D86, 010001 (2012). And also see S. L. Cheng, C. Q. Geng, and W. T. Ni, Phys. Rev. D52, 3132 (1995) on the possible 645 range of the ratio on the 646 electromagnetic to color anomaly factors of the axial current associated with the axion,  $E/N$ .