

# 素粒子と宇宙： ある遍歴

東京大学名誉教授 吉村太彦

学部・大学院・ポスドク時代：素粒子標準理論との邂逅

東北大学：大統一理論と宇宙論研究

ニュートリノ振動実験との関わり：立ち上げと事故復旧

岡山大学：原子を利用したニュートリノ実験原理の理論研究

最近2年間の東京自宅での研究生活：宇宙論への回帰

# 教育・研究環境の変化



Y. Nambu

- 理学部・修士大学院 東京大学6年間 修士指導教員 宮沢弘成教授
- 博士課程 シカゴ大学 3年間 博士指導教員 南部陽一郎教授
- 3度のポスドク カリフォルニア大学バークレー校、ペンシルバニア大学、パリ・エコールノルマル。合計約5年間
- 最初の助教 東北大学 4年間
- 准教授・教授 KEK 8年半
- 再び、東北大学へ 約13年間
- 宇宙線研究所所長 3年間
- 岡山大学 教授3年そして研究専任特任教授、量子宇宙研究センターの立ち上げ。計約18年
- 約2年前に岡山大学退職、東京自宅で悠々自適に研究。

学部時代：基礎が不十分なまま原著論文を漁った。

- Kabir の弱い相互作用の論文選集をよく読んだ。
- 1960年代前半までの重要論文を網羅
  
- Lee-Yang のパリティ非保存
- $(V-A) \times (V-A)$  で完璧な現象論
- 場の理論としてはナンセンス

素晴らしいドラマを予見

# Influential paper 1 Yang-Mills

ments in recent years<sup>4</sup> on the energy levels of light nuclei strongly suggest that this assumption is indeed correct. An implication of this is that all strong interactions such as the pion-nucleon interaction, must also satisfy the same conservation law. This and the knowledge that there are three charge states of the pion, and that pions can be coupled to the nucleon field *isospin*, lead to the conclusion that pions have isotopic spin unity. A direct verification of this conclusion was found in the experiment of Hildebrand<sup>5</sup> which compares the differential cross section of the process  $\pi^+p \rightarrow \pi^+d$  with that of the previously measured process  $p+p \rightarrow \pi^+d$ .

The conservation of isotopic spin is identical with the requirement of invariance of all interactions under isotopic spin rotation. This means that when electromagnetic interactions can be neglected, as we shall hereafter assume to be the case, the orientation of the isotopic spin is of no physical significance. The differentiation between a neutron and a proton is then a purely arbitrary process. As usually conceived, however, this arbitrariness is subject to the following limitation: once one chooses what to call a proton, what a neutron, at one space-time point, one is then not free to make any choices at other space-time points.

It seems that this is not consistent with the localized field concept that underlies the usual physical theories. In the present paper we wish to explore the possibility of requiring all interactions to be invariant under *independent* rotations of the isotopic spin at all space-time points, so that the relative orientation of the isotopic spin at two space-time points becomes a physically meaningless quantity (the electromagnetic field being neglected).

We wish to point out that an entirely similar situation arises with respect to the ordinary gauge invariance of a charged field which is described by a complex wave function  $\psi$ . A change of gauge<sup>6</sup> means a change of phase factor  $\psi \rightarrow \psi'$ ,  $\psi' = (\exp i\alpha)\psi$ , a change that is devoid of any physical consequences. Since  $\psi$  may depend on  $x, y, z$ , and  $t$ , the relative phase factor of  $\psi$  at two different space-time points is therefore completely arbitrary. In other words, the arbitrariness in choosing the phase factor is local in character.

We define *isotopic gauge* as an arbitrary way of choosing the orientation of the isotopic spin axes at all space-time points, in analogy with the electromagnetic gauge which represents an arbitrary way of choosing the complex phase factor of a charged field at all space-time points. We then propose that all physical processes (not involving the electromagnetic field) be invariant under an isotopic gauge transformation,  $\psi \rightarrow \psi'$ ,  $\psi' = S\psi$ , where  $S$  represents a space-time dependent isotopic spin rotation.

To preserve invariance one notices that in electro-

dynamics it is necessary to counteract the variation of  $\alpha$  with  $x, y, z$ , and  $t$  by introducing the electromagnetic field  $A_\mu$  which changes under a gauge transformation as

$$A_\mu' = A_\mu + \frac{1}{e} \frac{\partial \alpha}{\partial x_\mu}$$

In an entirely similar manner we introduce a  $B$  field in the case of the isotopic gauge transformation to counteract the dependence of  $S$  on  $x, y, z$ , and  $t$ . It will be seen that this natural generalization allows for very little arbitrariness. The field equations satisfied by the twelve independent components of the  $B$  field, which we shall call the  $b$  field, and their interaction with any field having an isotopic spin are essentially fixed, in much the same way that the free electromagnetic field and its interaction with charged fields are essentially determined by the requirement of gauge invariance.

In the following two sections we put down the mathematical formulation of the ideas of isotopic gauge invariance discussed above. We then proceed to the quantization of the field equations for the  $b$  field. In the last section the properties of the quanta of the  $b$  field are discussed.

## ISOTOPIC GAUGE TRANSFORMATION

Let  $\psi$  be a two-component wave function describing a field with isotopic spin  $\frac{1}{2}$ . Under an isotopic gauge transformation it transforms by

$$\psi = S\psi', \quad (1)$$

where  $S$  is a  $2 \times 2$  unitary matrix with determinant unity. In accordance with the discussion in the previous section, we require, in analogy with the electromagnetic case, that all derivatives of  $\psi$  appear in the following combination:

$$(\partial_\mu - i\epsilon B_\mu)\psi.$$

$B_\mu$  are  $2 \times 2$  matrices (such that<sup>7</sup> for  $\mu = 1, 2$ , and  $3$ ,  $B_\mu$  is Hermitian and  $B_4$  is anti-Hermitian. Invariance requires that

$$S(\partial_\mu - i\epsilon B_\mu)\psi' = (\partial_\mu - i\epsilon B_\mu)\psi. \quad (2)$$

Combining (1) and (2), we obtain the isotopic gauge transformation on  $B_\mu$ :

$$B_\mu' = S^{-1}B_\mu S + \frac{i}{e} S^{-1} \frac{\partial S}{\partial x_\mu}. \quad (3)$$

The last term is similar to the gradient term in the gauge transformation of electromagnetic potentials. In analogy to the procedure of obtaining gauge invariant field strengths in the electromagnetic case, we

<sup>4</sup>T. Lauritsen, Ann. Rev. Nuclear Sci. 1, 67 (1952); D. R. Inglis, Revs. Modern Phys. 25, 390 (1953).

<sup>5</sup>R. H. Hildebrand, Phys. Rev. 89, 1090 (1953).

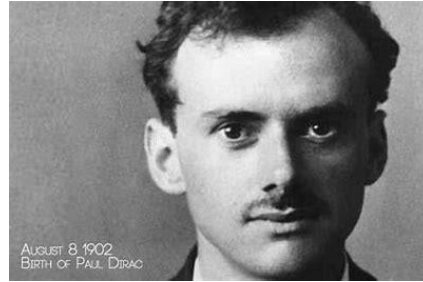
<sup>6</sup>W. Pauli, Revs. Modern Phys. 13, 203 (1941).

<sup>7</sup>We use the conventions  $\hbar = c = 1$ , and  $x_\mu = it$ . Bold-face type refers to vectors in isotopic space, not in space-time.

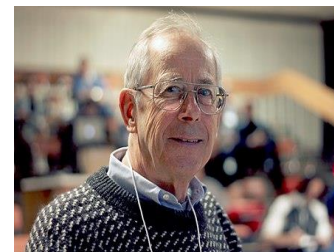
- 当時はほとんど引用されていなかったが、知る人ぞ知る論文だったよう。関連して、桜井純先生の長大な論文にも影響された。
- 学部4年でセミナー指導を受けた、岡林先生の影響もあったかもしれない。

# 最初の宇宙論への志向

- 学部時代に、岩波・科学で早川幸男先生のディラック large number hypothesis の紹介を読んだ。



- 江沢洋先生がアメリカから帰国された折、伝えたニュース。発見直後の Penzias-Wilson による3K宇宙背景マイクロ波、ガモフ理論の復興。



From Wikipedia, the free encyclopedia

The **Dirac large numbers hypothesis (LNH)** is an observation made by [Paul Dirac](#) in 1937 relating ratios of size scales in the [Universe](#) to that of force scales.

The ratios constitute very large, dimensionless numbers: some [40 orders of magnitude](#) in the present cosmological epoch. According to Dirac's hypothesis, the apparent similarity of these ratios might not be a mere coincidence but instead could imply a [cosmology](#) with these unusual features:

- The strength of gravity, as represented by the [gravitational constant](#), is inversely proportional to the [age of the universe](#):
- The mass of the universe is proportional to the square of the universe's age: .
- Physical constants are actually not constant.  
Their values depend on the age of the Universe.

# The Oklo bound on the time variation of the fine-structure constant revisited

Thibault Damour<sup>a,b,c</sup>, Freeman Dyson<sup>b</sup>

## 1 Introduction

Since Dirac [1] first suggested it as a possibility, the time variation of the fundamental constants has remained a subject of fascination which motivated numerous theoretical and experimental researches. For general discussions and references to the literature see, e.g., [2, 3, 4, 5]. Superstring theories have renewed the motivation for a variation of the “constants” by suggesting that most of the dimensionless coupling constants of physics, such as the fine structure constant  $\alpha = 1/137.0359895(61)$ , are functions of the vacuum expectation values of some scalar fields (see, e.g., [6]). Recently, a mechanism for fixing the vacuum expectation values of such *massless* stringy scalar fields (dilaton or moduli) has been proposed [7]. This mechanism predicts that the time variation of the coupling constants, at the present cosmological epoch, should be much smaller than the Hubble time scale, but maybe not unmeasurably so. In this model, the time variations of all the coupling constants are correlated, and the ones of most observational significance are the fine structure constant  $\alpha$  and the gravitational coupling constant  $G$ . In the present paper, we revisit the current best bounds on the variation of  $\alpha$ .

## References

- [1] P.A.M. Dirac, Nature 139 (1937) 323; Proc. Roy. Soc. A165 (1938) 199.
- [2] F.J. Dyson, The fundamental constants and their time variation *in Aspects of Quantum Theory*, eds A. Salam and E.P. Wigner (Cambridge University Press, Cambridge, 1972), pp 213-236.
- [3] F.J. Dyson, Variation of constants *in Current Trends in the Theory of Fields*, eds J.E. Lannutti and P.K. Williams (American Institute of Physics, New York, 1978) pp 163-167.
- [4] P. Sisterna and H. Vucetich, Phys. Rev. D41 (1990) 1034.
- [5] D.A. Varshalovich and A.Y. Potekhin, Space Science Reviews 74 (1995) 259.
- [6] M.B. Green, J.H. Schwarz and E. Witten, Superstring theory (Cambridge University Press, Cambridge, 1987).
- [7] T. Damour and A.M. Polyakov, Nucl. Phys. B423 (1994) 532; Gen. Rel. Grav. 26 (1994) 1171.

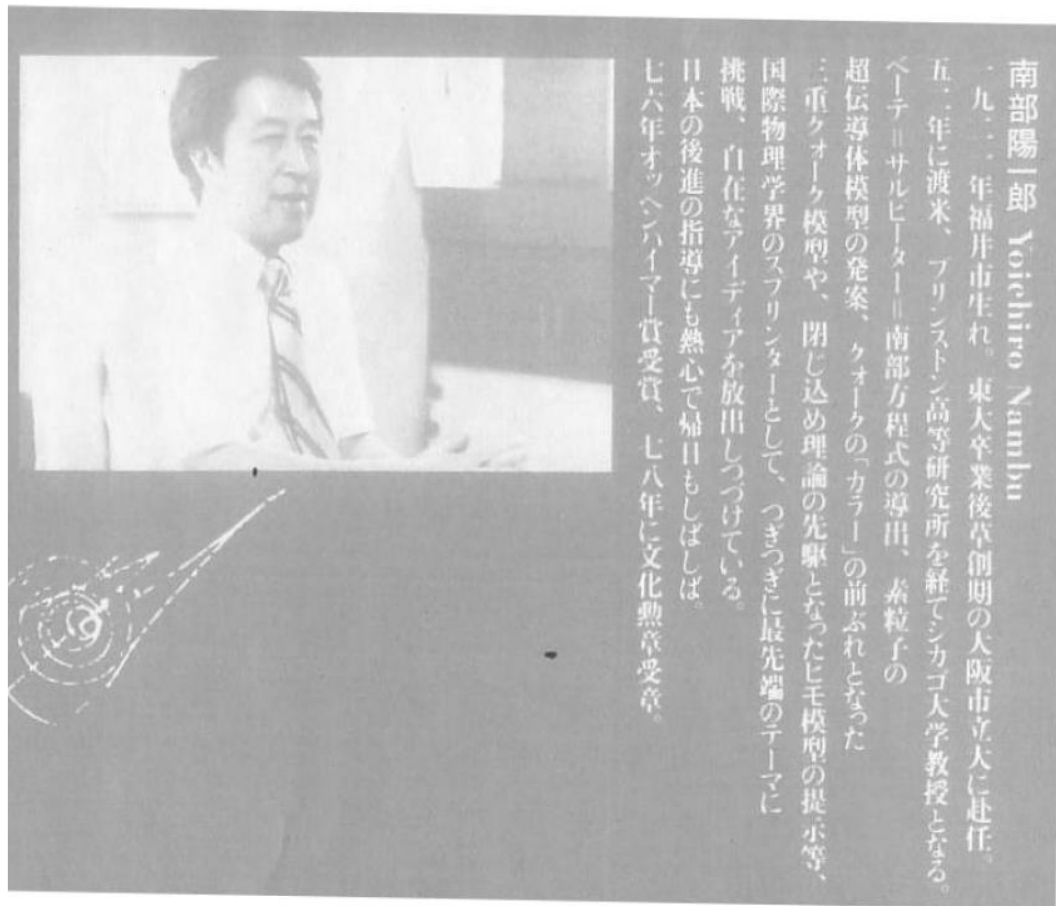
## 20代のとき：素粒子物理の転換点

- 大学院時代（‘65ー’70、東大、シカゴ大）  
Dual resonance model (ハドロンの弦模型、のちに  
万物の超弦模型に発展)  
クォーク模型、Deep inelastic scattering
- ポスドク時代（‘70ー’75、バークレイ、ペン、パリ）  
電弱統一理論

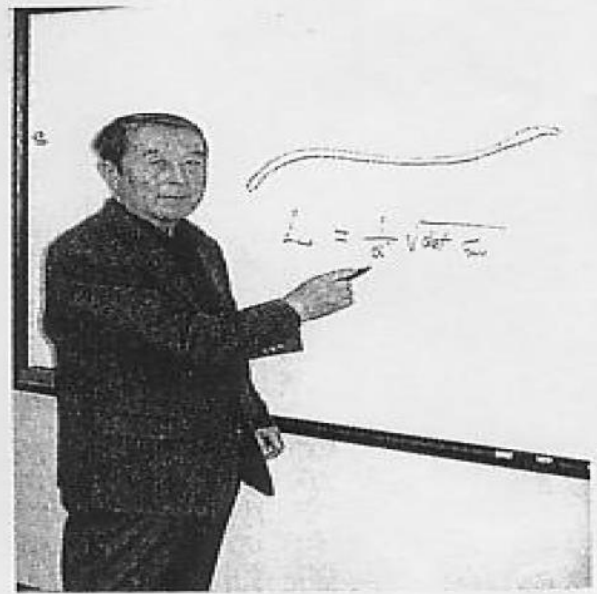




# 南部陽一郎先生



なんぶ・よういちろう  
シカゴ大学名誉教授。1921年、東京生まれ。東大物理学科卒。大阪市立大学教授などを経て、58年から90年までシカゴ大教授。米国科学賞、ウルフ賞（イスラエル）などを受賞。文化勲章受章。



私が接触できた頃は、SSB、カラーの導入後のことで、ひも理論構築期だった。

# 標準理論との最初の関わり

## 基礎概念の確立

3世代、それぞれ2種類、計6種類のクォークとレプトンの世界

### 第1世代



Salam Glashow Weinberg



P.W. Higgs



Y. Nambu

電子  
 $\left( \begin{array}{c} \text{電子} \\ \text{電子ニュートリノ} \end{array} \right)$

$\left( \begin{array}{ccc} u & u & u \\ d & d & d \end{array} \right)$

強い相互作用



弱い相互作用

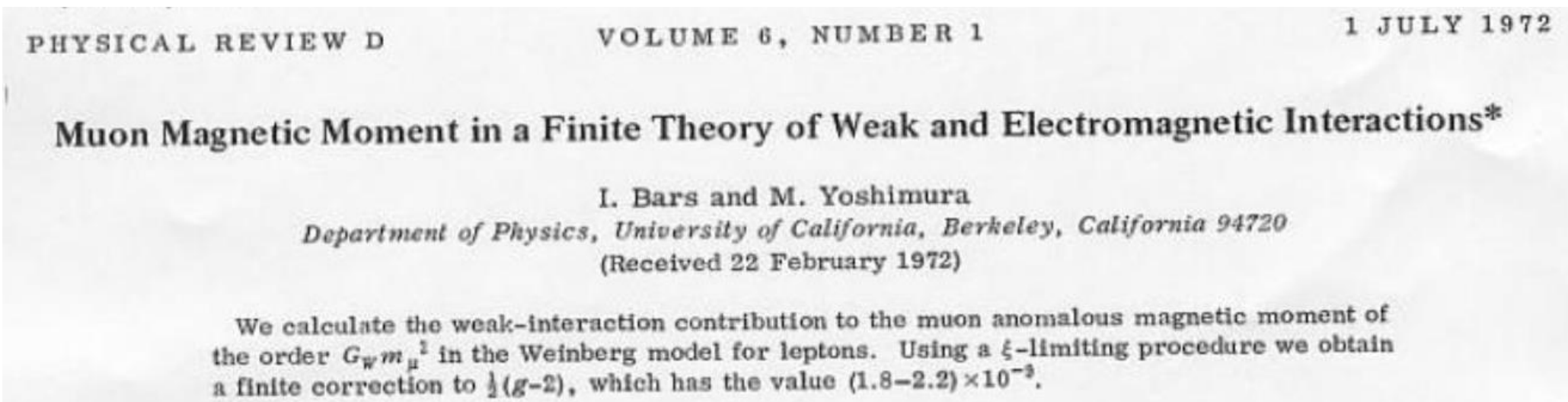
ゲージ理論に基づき、物質と力の法則が絡み合う。



C.N. Yang



大学院生と中堅の貢献大。  
 1967~1974年にかけて一挙に進展した。



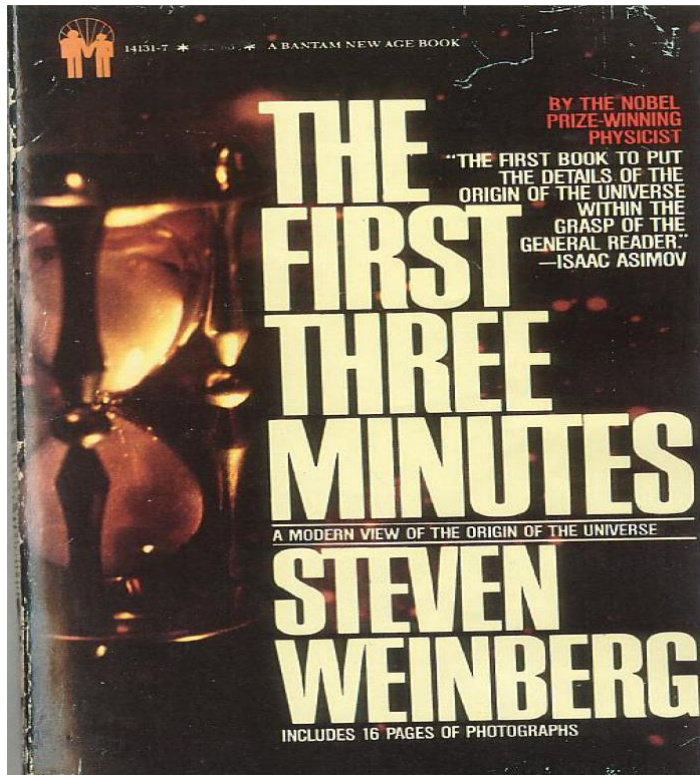
実験的に未確認

# 心がけたこと

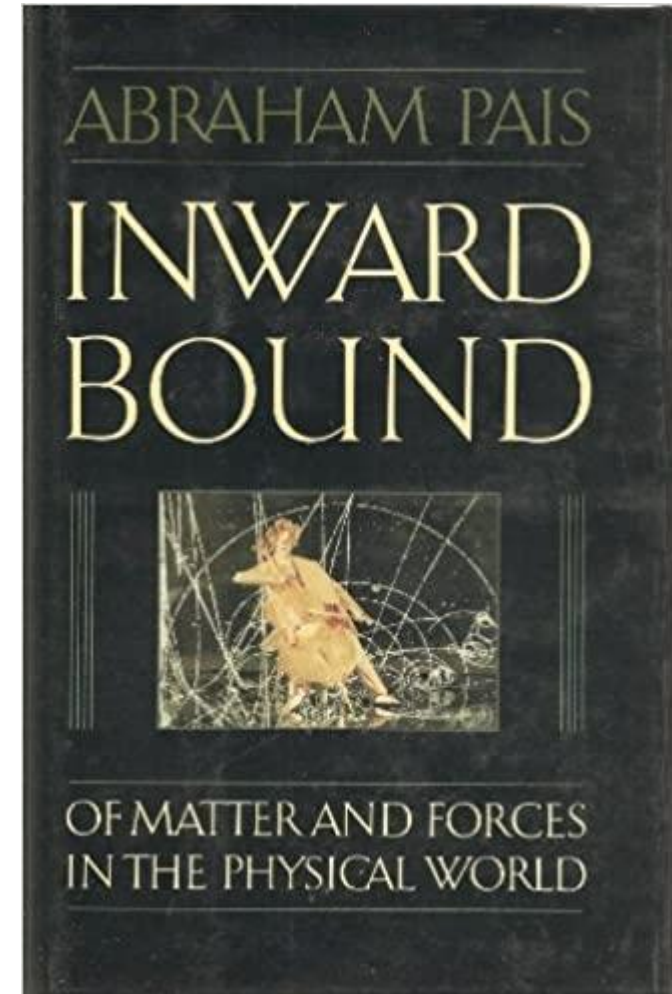
- 物理や科学は人が作り上げたもの。偉大な先人の手法に学ぶ。原典主義。偉人の伝記、自伝も読む。
- 人が手がけない新しいことを創造して、貢献したい。そのためには、アイデアをできるだけたくさん出して自分でつぶしていく。残ったアイデアを大事にする。細部の展開は人に任せて、常に新たな道を切り開くことを心がける。
- 今、何ができるかを知るために、自分のテリトリー以外のことも深く理解する。
- 最後は、数理的に深く究める。

一般書も役に立つ

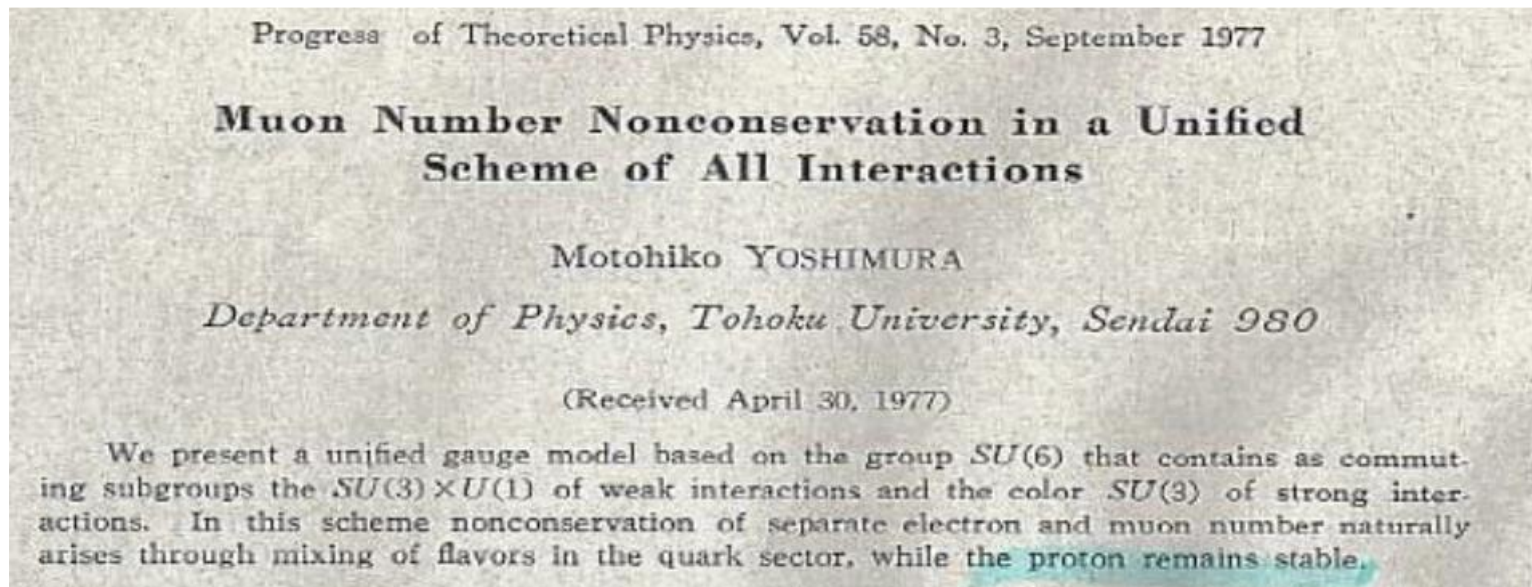
多大な影響を受けた。



量子力学から標準理論成立までの素粒子物理学の歴史を記述した名著



# バリオン数を保存する大統一理論の構築



評価してくれた科学史家

しかし、グローバル対称性導入は人為的でむしろバリオン数非保存を受け入れるべきではないか

## 2つの重要な、GUT予言

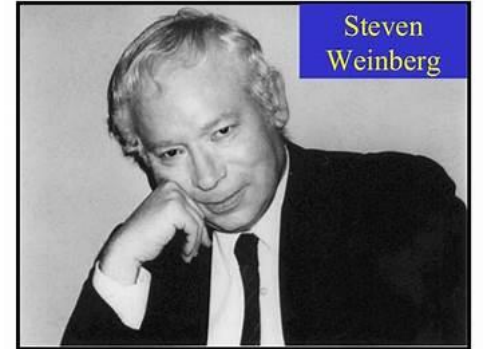
- B – and L – nonconservation  
Quantum numbers not associated with gauge force are all approximate. Only the rate is questioned.
- Finite neutrino masses and mixing
- Heavy chiral partner of neutrinos:  
can be responsible for leptogenesis  
A link to cosmology

ニュートリノの小さな有限質量と混合は実験的に確定。マヨラナ性は証明されていない。ディラック粒子の場合は小さな質量の説明が必要。

## 正しい偏見

ある有名なノーベル物理学賞受賞者 (S. Weinberg) は、名著”The First Three Minutes”のなかで、

”However, I do not believe that scientific progress is always best advanced by keeping an altogether open mind. It is often necessary to forget one’s doubts and to follow the consequences of one’s assumptions wherever they may lead—the great thing is not to be free of theoretical prejudices, but to have the right theoretical prejudices. And always, the test of any theoretical preconception is in where it leads.”



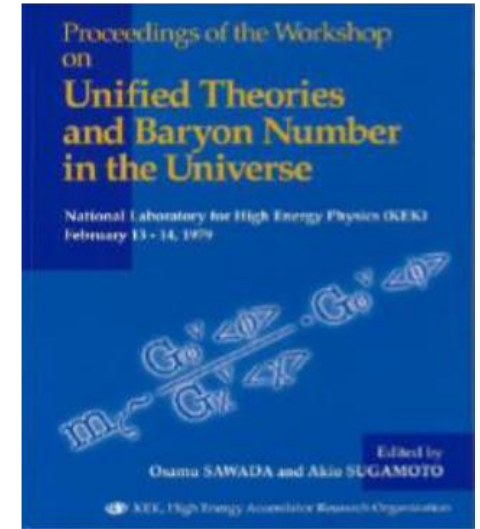
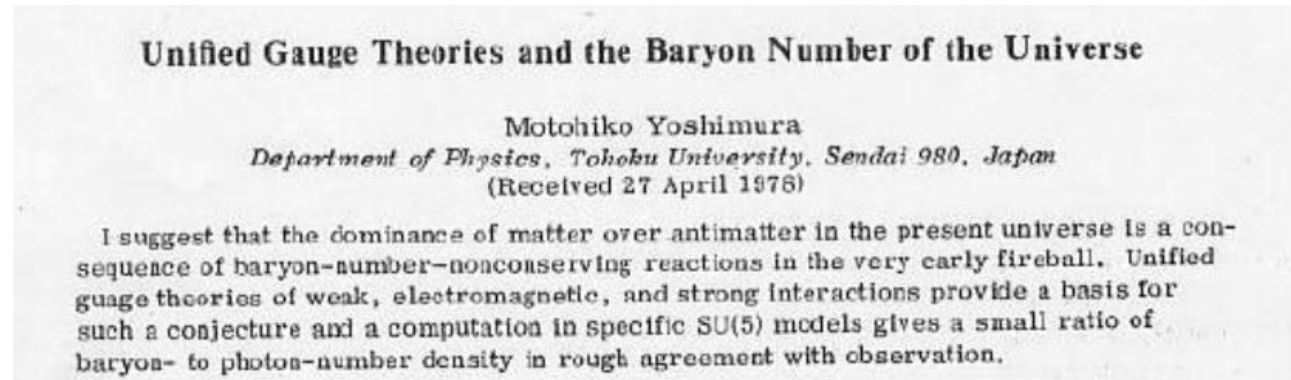
要するに、知られた事実に照合して誤りの見つからない作業仮説、を設けてそれをとことん、追求せよ、ということである。ここではへりくだって、あえて偏見という言葉を使っている。生半可な追求はいけない。とことん追求するのが大事である。たいていの作業仮説は追求すると、ぼろが出て、間違いであることが判明する。

西洋の学者の考えのなかに **falsifiable な説を尊重**すべきだという信念がある。真偽が将来明らかになりうることを議論の対象にせよ、との意である。真偽の確かめようもない説を議論するのは、ある意味で科学ではなく、神話の世界であろう。ましてや、自然科学は実証を必要とする経験科学である。どんな法則もそれが内包するあらゆる帰結を、観測、実験により確かめなければ正しいものとはいえない。

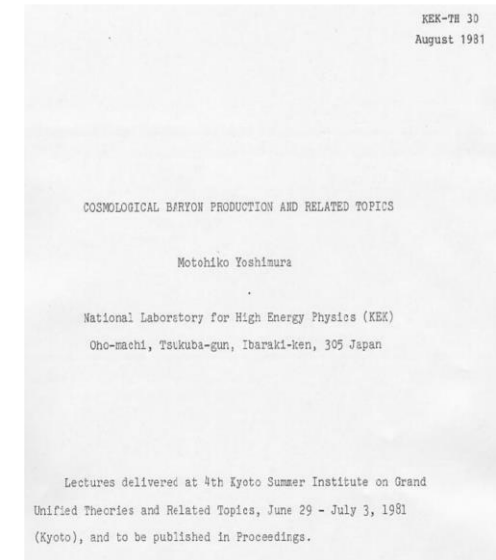
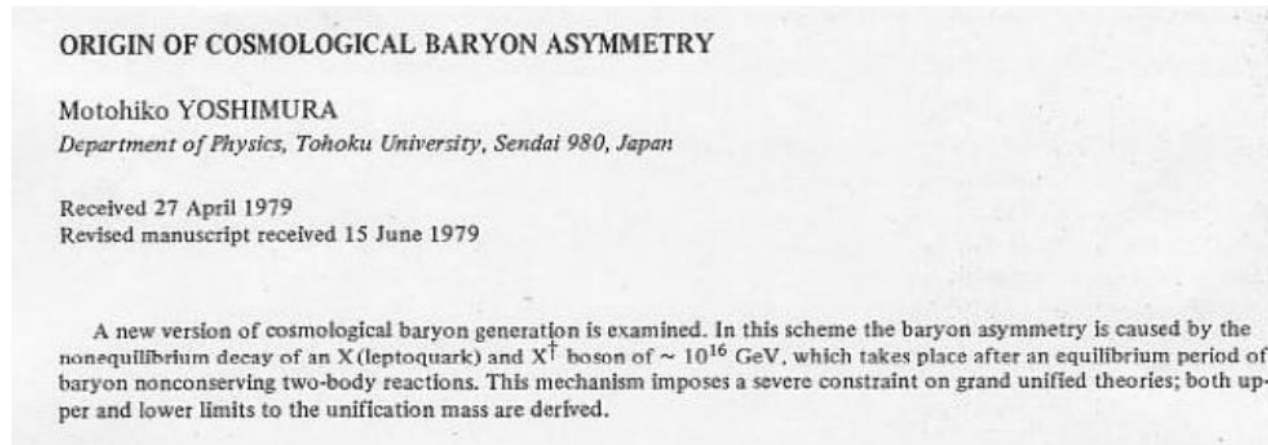
しかしワインバーグにも baryo-genesis に関して、たぶん、間違った偏見があった。

# Baryogenesis papers

PRL



Physics Lett.



QCDのasymptotic freedom が計算を可能とするのに本質的な役割を果たした。

# Sakharov's response to my paper

To dear M. Yoshimura,  
 Department of Physics  
 Tohoku University, Sendai 980  
 Japan  
 3/√1 A.C.

Baryon asymmetry of the Universe  
 A.D. Sakharov  
 P.N. Lebedev Physical Institute, Academy of Sciences  
 of the USSR.

A possible process of the appearance of baryon and anti-lepton excess at the early stage of the charge-neutral hot Universe expansion in the unified gauge theory of strong, weak and electromagnetic interactions is discussed. By the estimate presented here the baryon asymmetry  $A = \frac{N_B}{N_\gamma}$  (the ratio of the mean baryon density to the relic radiation quantum density, to an accuracy of the numerical factor equal to the ratio of the number of baryons to the initial entropy of the hot Universe, in the same co-moving volume) is equal, in the order of magnitude to  $A \sim \alpha^3 \sqrt{\delta_a}$ . The value  $\alpha = g^2$  is the gauge field interaction constant,  $\beta$  is the quantity of the order of the Cabibbo angle,  $\delta_a$  is the phase of complex quark mixing. The numerical coefficient in this formula may contain an additional small parameter. Some considerations are expressed concerning the many-sheet model of the Universe suggested before by the author.

1. Introduction, Estimation of the effect.

In 1966 the author expressed the supposition that the observed baryon (and supposed lepton) asymmetry of the Universe appears at the early stage of cosmological expansion from the initial neutral charge state. Such a process is possible due to the effects of CP-invariance violation in non-stationary conditions of expansion if the baryon and lepton charge conservation is supposed to be broken [1].

# Historical account

サハロフ回想録上  
 ●水爆開発の秘密  
 アンドレイ・サハロフ著  
 金光不二夫・木村晃三訳  
 ANDREI SAKHAROV  
 読売新聞社

を否定したり、クォークが整数の電荷を持つという理論を支持すると言わなければならないことが付いた。

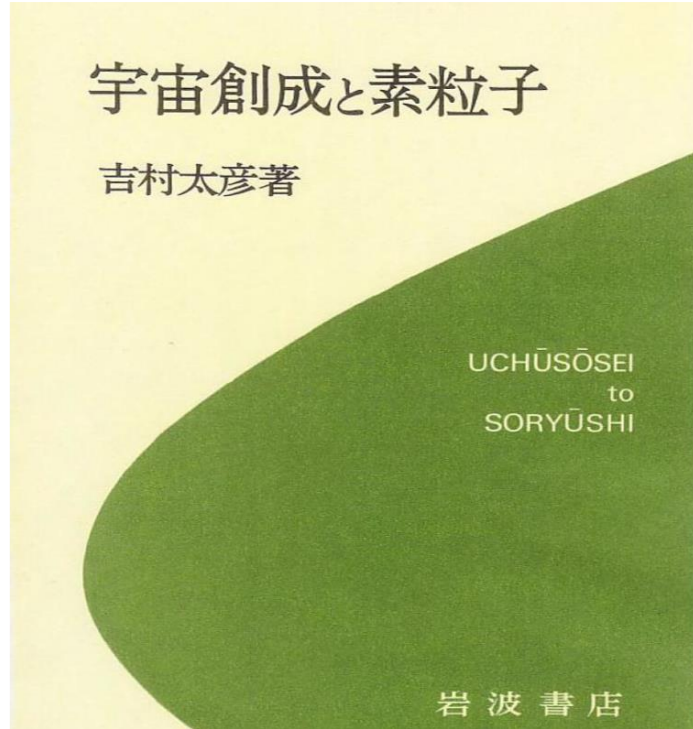
量子色力学

実際には、クォークが分数の電荷を持つというはるかに美しい理論が正しいことは、その時点でさえにはば確定的だった。その後の発展は、強い相互作用に関する力学理論である、いわゆる量子色力学を含むこの理論を立証した。この理論ではクォークは色と呼ばれる自由度を与えられ、量子色力学という名前もここからきている。量子色力学 (QCD) は、質量その他のハドロン (バリオンと中間子) の性質を記述する上で大きな成功をおさめた。QCD の重要な特徴は、クォークの閉じこめである。すなわちクォークは、原子から電子を分離するようには、バリオンあるいは中間子から分離することができない。それは、距離とともに減少しない力によってクォークを保持する「弦」ができるからである。

私は、自分の失言を訂正しようと、前日の外国人科学者を会議場で探したが、彼の名前を知らなかったのてついに探すことができなかった。

七八年に吉村大彦は、大統一理論を宇宙のバリオン非対称性に結びつけた重要な論文を発表した。これは私もやればできたはずなのに、やらなかったものだ。大統一理論とバリオン非対称性との関係の問題については、吉村以前にすでにソ連のイグナチエフ、クラスニコフ、クジミン、タフヘリージェが国際学会で発表していたが、しかしいちはば広く認められたのは吉村の論文である。これらの論文は強い印象を与え、これに刺激されてとりわけ X ボゾン、Y ボゾンやいわゆる





著名な科学史家による多大な評価



# 1979年2月研究会

## 研究会の御案内

下記のような要領で研究会を開きます。

- 1) テーマ 宇宙のバリオン数と統一理論
- 2) 日時 2月13日 9:30 PM ~  
2月14日 夕刻
- 3) 場所 高エネルギー物理学研究所
- 4) 別紙のようなプログラム(案)で講演を予定しています。
- 5) 興味をお持ちの方で参加を希望される方はその旨に宿泊の予定も添えて、今月末日迄に下記へ申し込んで下さい。

〒300-32  
茨城県筑波郡大穂町上原 1-1  
高エネルギー物理学研究所  
荒船次郎

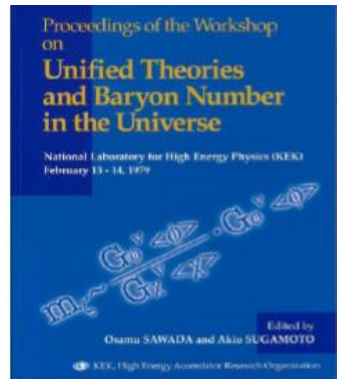
昭和54年1月25日

世話人代表  
菅原寛孝

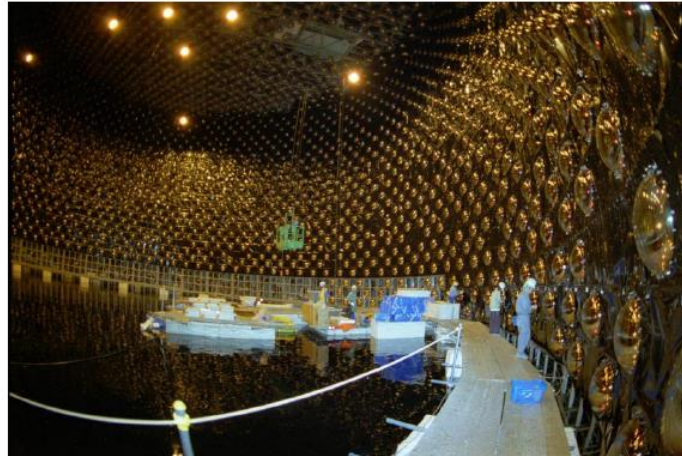
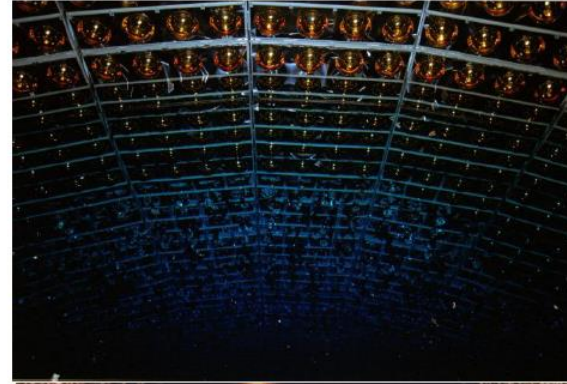
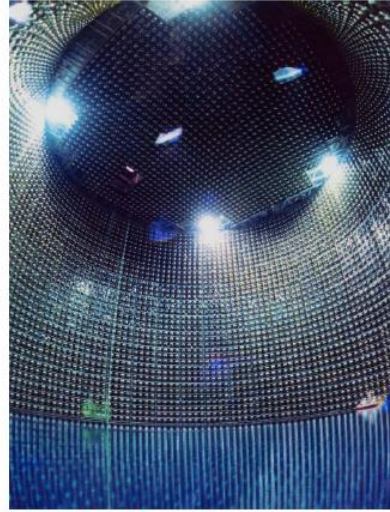
乞  
掲  
示

## 宇宙バリオン数と統一理論研究会プログラム(案)

| 13日  | 14日                      | 時刻    |
|------|--------------------------|-------|
|      | 木口義勝                     | 9:30  |
|      | クォークプラズマ                 | 10:15 |
|      | 佐藤(倫)<br>佐々木             | 11:15 |
|      | 佐藤(文)                    | 12:00 |
|      | 昼休み                      |       |
| 1:30 | 吉村                       | 1:30  |
| 2:30 | 宇宙バリオン数                  | 2:15  |
|      | Comments and Discussions | 2:15  |
| 3:00 | 木舟 and/or 渡辺             | 3:00  |
| 3:15 | 陽子の寿命の観測                 | 3:00  |
|      | tea time                 | 3:15  |
| 4:00 | 沢田 and/or 高岩<br>陽子の寿命の計算 | 3:15  |
|      | 井工中野                     | 3:15  |
| 5:00 | 統一理論                     |       |
|      | Comments and Discussions |       |
|      | 藤川、柳田<br>comment         |       |



# SK 復旧



所長任期3年の大半を復旧関連の仕事に忙殺された

# Lepto-genesis

Nambu, A Foreteller of Modern Physics II

## Yet another symmetry breaking to be discovered

M. Yoshimura\*

*Center of Quantum Universe, Faculty of Science, Okayama University, Tsushima-naka 3-1-1,  
Kita-ku, Okayama 700-8530, Japan*

\*E-mail: yoshim@okayama-u.ac.jp

Received March 11, 2016; Accepted March 12, 2016; Published June 3, 2016

.....  
The discovery of spontaneous symmetry breaking in particle physics was the greatest contribution in Nambu's achievements. There is another class of symmetries that exist in low-energy nature, yet is doomed to be broken at high energy, due to a lack of protection of the gauge symmetry. I shall review our approach to searching for this class of symmetry breaking, the lepton number violation linked to the generation of the matter-antimatter asymmetry in our universe.  
.....

- Sphaleron と呼ばれる topological object の媒介により、 $B-L$  は保存するが、 $B, L$  は単独に保存しないことが、宇宙初期の高温 (electroweak scale の10倍程度) で起こることが、シミュレーションを含めて証明された。
- 従って、より高温期に発生したレプトン数は sphaleron 効果でバリオン数に一部転化できる。レプトン数非保存は中性ニュートリノがマヨラナ粒子だと可能になる。最初の非保存効果はレプトン数でもよい。
- 重いマヨラナ粒子の崩壊が CP 非保存とともにレプトン非対称を発生する。さらに、シーソー機構により非常に軽い質量の通常ニュートリノをつくる。ニュートリノ振動の発見により、このシナリオは現実味を帯びてきた。

# 岡山大学でのニュートリノ質量分光実験原理の研究

## どうして原子を使うのか

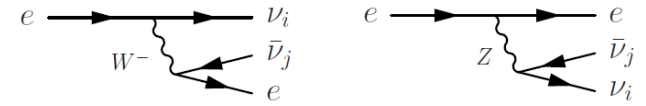


図 1: RENP 過程に寄与する 2 つのファインマン図.

- Infinitely many small energies

$$\Delta E_{n_1, n_2} \sim 13.6 \text{eV} \times \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

想定されるニュートリノ質量に近い

- Small pair emission rate of neutrino pair emission

$$\frac{G_F^2 \Delta^5}{15\pi^3} \approx 3.3 \times 10^{-34} \text{s}^{-1} \left( \frac{\Delta}{\text{eV}} \right)^5$$

素過程の確率は極端に小さい

- How to enhance the rate is crucial

resonance

target coherence (like superradiance)

位相整合によるコヒーランスによる  
レート増幅。超放射の例がある。

## Unique signature of Majorana = interference of identical fermions

$$\sum_{h_1 h_2} |j_M \cdot j^e|^2 = \sum_{h_1 h_2} |j_D \cdot j^e|^2 + \delta_{ij} \frac{m_i m_j}{2E_1 E_2} (j_0^e (j_0^e)^\dagger - \vec{j}^e \cdot (\vec{j}^e)^\dagger)$$

同種フェルミ粒子2つによる干渉効果がマヨラナで存在。

- Effective only for pair emission
- Appear only (ii) threshold; proportional to  $m_i^2$   
( $\nu_i \nu_j$ )  $i \neq j$  pair
- Can be positive or negative
- Direct test of Majorana nature cf LV in  $(0\nu)\beta\beta$

この実験原理はマヨラナかディラックかを決定できる。ニュートリノを伴わない2重ベータ崩壊ではディラックなら起こらない。

# Radiative neutrino pair emission from collective excited atoms

- Radiative pair emission has valuable information of neutrino mass spectroscopy

Simplified treatment of coherence

$$I = \int dk_\gamma dk_{2\nu} \left| \sum_a e^{i\vec{r}_a \cdot (\vec{k}_\gamma + \vec{k}_{2\nu})} \mathcal{M}(\vec{r}_a, \vec{k}) \right|^2$$

When coherence over atoms at  $\vec{r}_a$  exists,

$$I \sim n^2 V \int dk_\gamma dk_{2\nu} F(\vec{k}_\gamma + \vec{k}_{2\nu}) |\mathcal{M}(\vec{0}, \vec{k})|^2$$

$$F(\vec{K}) = \left| \int_V d^3r e^{i\vec{K} \cdot \vec{r}} \right|^2$$

with  $n$  the number density, and  $F(\vec{K})$  the shape factor of target...

with  $n$  the number density of atoms. Thus,  $I = n^2 V \times$  a single atom contribution.

$$|\mathcal{M}|^2 = \frac{|\langle 3 | \vec{d} \cdot \vec{\epsilon} | 2 \rangle|^2 |\mathcal{M}_{21,2\nu}|^2}{(\omega - \Delta_{23})^2 + (\gamma_1 + \gamma_2)^2 / 4}$$

$$\frac{N^2 G_F^2 \Delta_{23}^2}{V \pi^2} \sim 3 \times 10^{-2} \text{sec}^{-1} \left( \frac{\Delta_{23}}{0.5 \text{eV}} \right)^2 \left( \frac{N}{10^{15}} \right)^3 \frac{10^3 \text{cm}^3}{V}$$

300 events / day

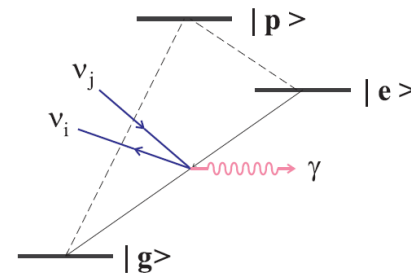
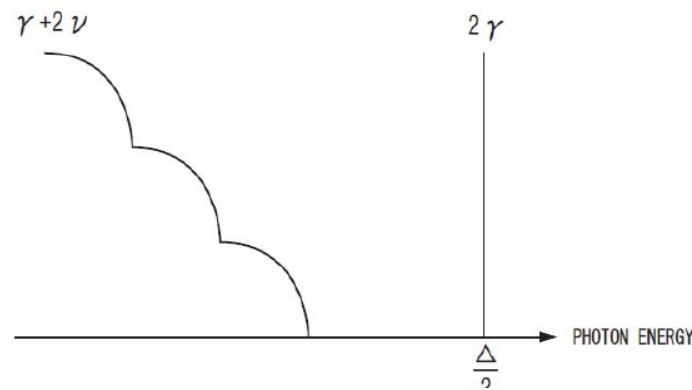
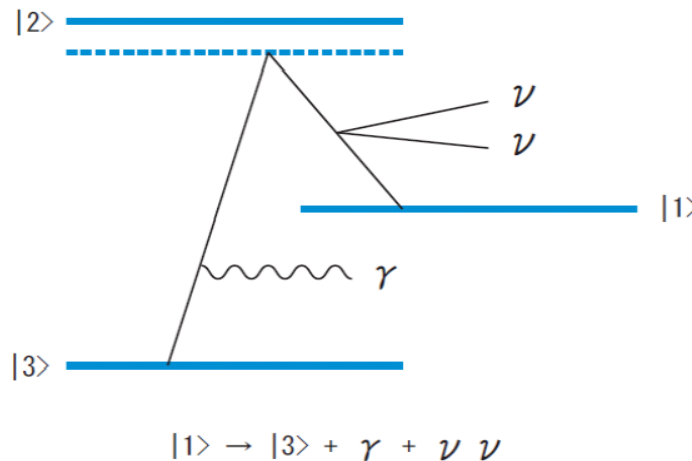


図1: RENP に用いられる  $\Lambda$  型の素過程の例

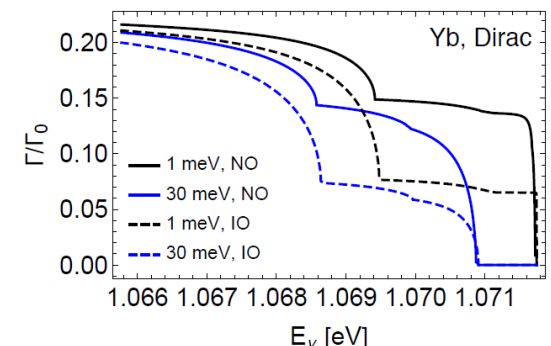
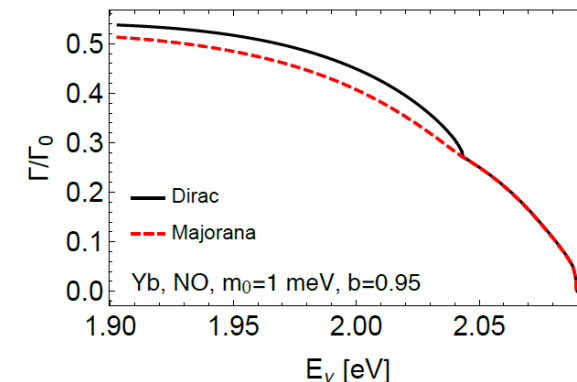


図2 Yb の RENP スペクトル。黒線は  $m_0 = 1 \text{ meV}$ , 青線は  $m_0 = 30 \text{ meV}$ , 実線は NO, 破線は IO.





## Experimental method of detecting relic neutrino by atomic de-excitation

M. Yoshimura,<sup>1,\*</sup> N. Sasao,<sup>2,†</sup> and M. Tanaka<sup>3,‡</sup>

究極の目標は宇宙背景ニュートリノの検出。  
 パウリ排他原理による閾値付近のレートのゆがみを測定。

より詳しい解説記事は物理学会誌にある。

最近の研究から

原子からニュートリノを引き出せるか – コヒーレンスの新奇な応用

田中 実 (大阪大学大学院理学研究科 tanaka@phys.sci.osaka-u.ac.jp)

笹尾 登 (岡山大学異分野基礎科学研究所 sasao@okayama-u.ac.jp)

吉村太彦 (岡山大学異分野基礎科学研究所 yoshim@okayama-u.ac.jp)

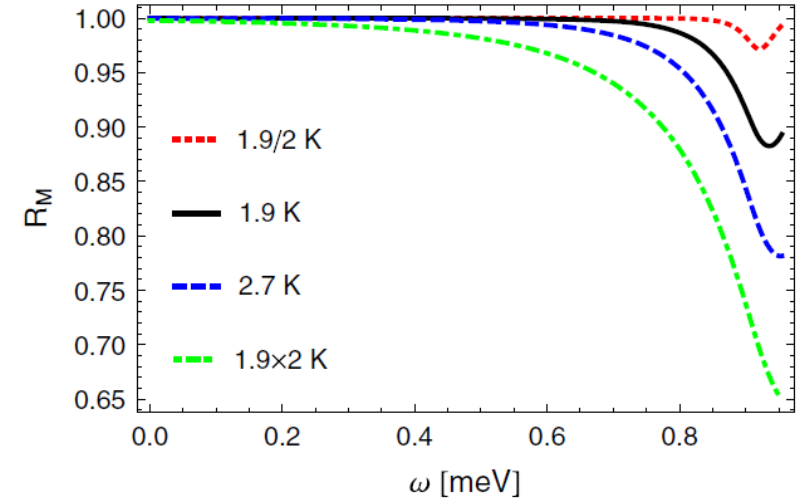


FIG. 1 (color online). Spectral distortion  $R_M(\omega)$  caused by the Pauli blocking of relic neutrinos,  $T_\nu = 1.9/2$  K in dotted red, 1.9 K in solid black, 2.7 K in dashed blue, and  $1.9 \times 2$  K in dash-dotted green, all assuming  $m_0 = 5$  meV,  $\epsilon_{eg} = 11$  meV, and the zero chemical potential. Distortions are identical for the two cases of NH and IH.

# 岡山大学でのtable top 準備実験： 弱いQED2次の2光子放出の15桁レート増幅に成功

# 高エネルギーニュース記事

## 原子を用いたニュートリノ質量分光 —その現状と将来の展望—

岡山大学 理学部附属・量子宇宙研究センター  
植竹 智 吉村 太彦  
uetake@okayama-u.ac.jp yoshim@okayama-u.ac.jp

岡山大学 極限量子研究コア  
吉村 浩司 笹尾 登  
yosimura@okayama-u.ac.jp sasao@okayama-u.ac.jp

2014年(平成26年)8月22日

## 15桁の増幅

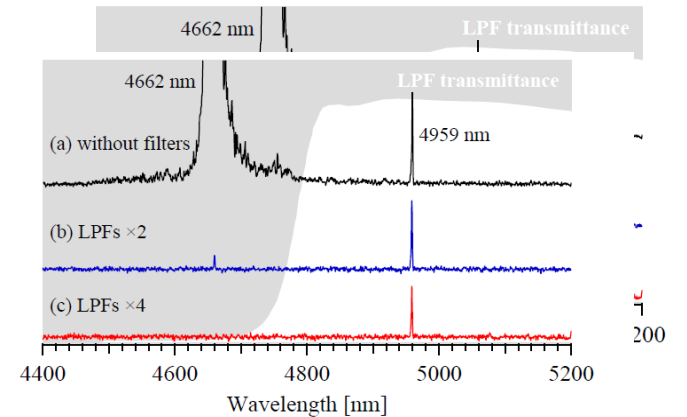


図 12: 実験結果。二光子対 (4.66  $\mu\text{m}$  および 4.96  $\mu\text{m}$ ) が観測された。(a) LPF(Long-Pass Filter) なしの場合のスペクトル。四次ストークス光 (4.66  $\mu\text{m}$ ) と、その二光子対ペアである 4.96  $\mu\text{m}$  の光が観測されている。観測した信号の波長が確かに 4.96  $\mu\text{m}$  であることを確かめるため、図のグレーの網掛け部分に示す透過特性を持つ LPF を挿入して測定した。(b) LPF 二枚の場合、および (c) LPF4 枚の場合。4.66  $\mu\text{m}$  の光は強く減衰されているのに対し、4.96  $\mu\text{m}$  はほとんど変化していないことがわかる。この結果から、観測した信号の波長は間違いなく 4.96  $\mu\text{m}$  であるとわかる。

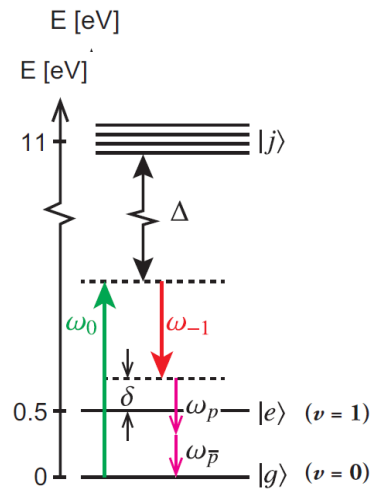
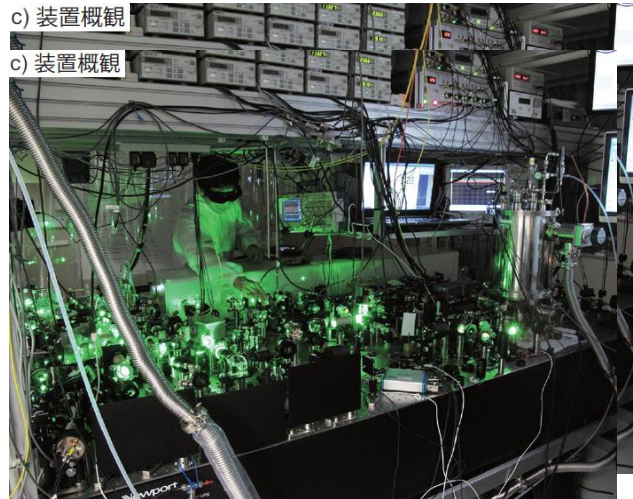


図 8: パラ水素分子のエネルギー準位。|g> と |e> は電子基底状態にあり、このうち |e> は振動励起状態で約 0.5 eV のエネルギーである。これらの状態から一光子遷移可能な電子励起状態 |j> は約 11eV のエネルギーである。コヒーレンス生成のために  $\omega_0$  と  $\omega_{-1}$  の二色のレーザー光を入射する。

基  
V  
能  
コ  
光

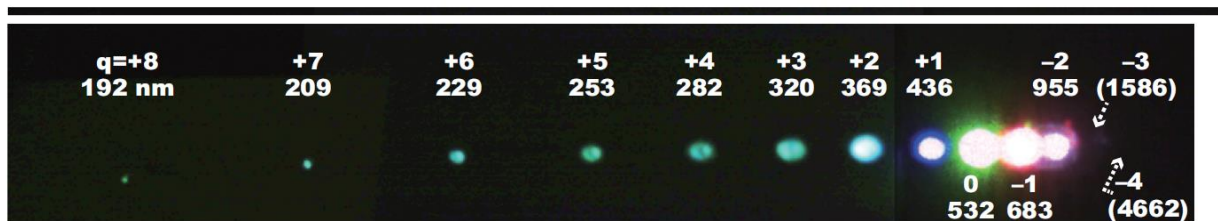
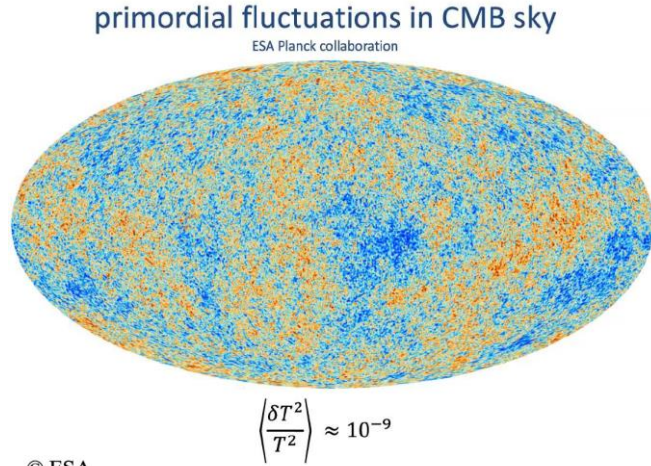
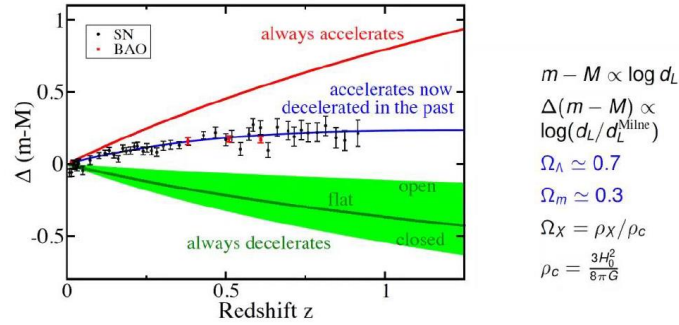


図 11: ラマンサイドバンド。高次のラマンサイドバンド発生は、系のコヒーレンスが大きいことを示している。三三  
次および四次ストークス光 (それぞれ 1.59  $\mu\text{m}$ , 4.66  $\mu\text{m}$ ) は別の検出器で発生を検出したもので、写真には現れて  
いない。紫外の光は蛍光シートにより可視光に変換して検出した。

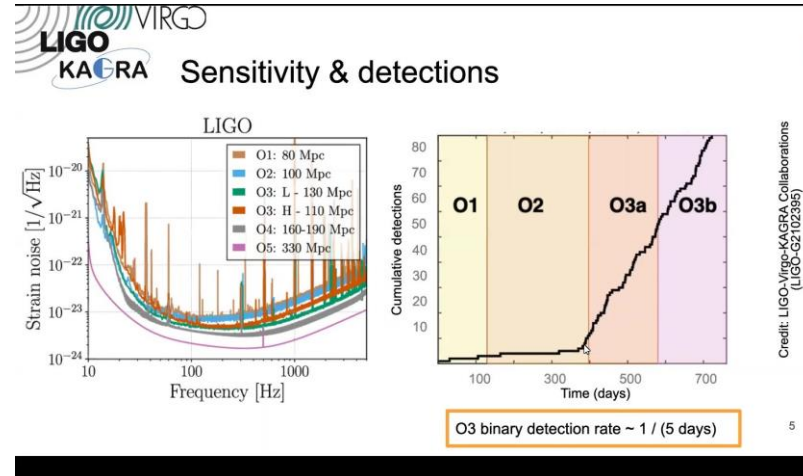
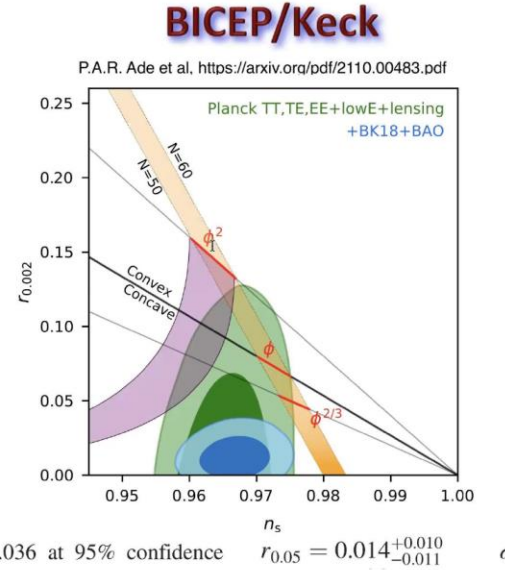
# 宇宙観測の進展とブラックホール合体による重力波の発見



© ESA



Compilation by Huterer & Shafer '17.  
Binned from 870 SNe Ia (black) and 3 BAO points (from BOSS DR12, red).



# 東京へ引退後の研究例：一つの目標として インフレーションとdark energy を単一起源から説明する

スカラー自由度導入の枠組みを整備する必要があった。

Jordan-Brans-Dicke 理論の拡張(massive etc)が有望。

拡張理論の整備を最初に行った。

Super-string 理論の higher string loops 補正を含む低エネルギー極限でも実現可能な結果。(Damour-Polyakov)

Einstein metric frame で標準理論に落とすと、5つのゲージ不変項にほぼ独立な conformal factor  $F$  の冪関数が乗算される：

$$\mathcal{L}_{st}^E = F^{p_g} \mathcal{L}_g + F^{p_{df}} \mathcal{L}_f - F^{p_H} V_J(H) + F^{p_{dH}} (D_\mu H)^\dagger (D^\mu H) + F^{p_Y} \mathcal{L}_y$$

$$V_{\text{eff}}(\chi) = \frac{V_J(\chi)}{F^\eta} \quad \text{Massless JBD とは異なる}$$

一般形はもう少し複雑で以下論文の付録に与えている。

Nucleo-synthesis 以後の宇宙論・観測と矛盾しないパラメータ  $p_i$  の設定が可能。

K.Kaneta, K-I.Oda, and M.Yoshimura JCAP

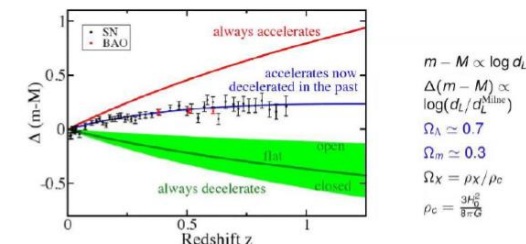
“Constraints on extended Jordan-Brans-Dicke gravity”

arXiv: 2304.08656v2 (2023).



初期宇宙への観測からの制約

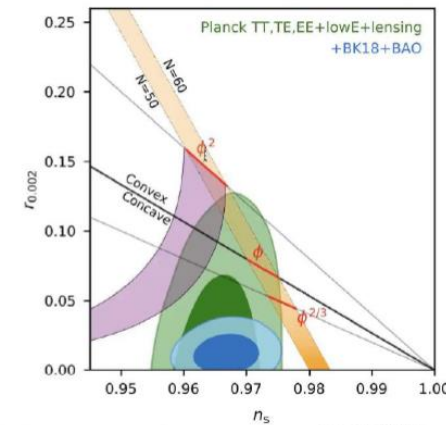
暗黒エネルギーの存在



インフレーションモデルへの制約

**BICEP/Keck**

P.A.R. Ade et al, <https://arxiv.org/pdf/2110.00483.pdf>



$r_{0.05} < 0.036$  at 95% confidence  $r_{0.05} = 0.014^{+0.010}_{-0.011}$   $\sigma(r) = 0.009$

# Damour-Polyakov: string full-loop incorporated

T. Damour and A.M. Polyakov, Nucl. Phys. B423 ,532 (1994).

$$S = \int d^4x \sqrt{\hat{g}} \left\{ \frac{B_g(\Phi)}{\alpha'} \hat{R} + \frac{B_\Phi(\Phi)}{\alpha'} [4\Box\Phi - 4(\widehat{\nabla}\Phi)^2] - B_F(\Phi) \frac{k}{4} \hat{F}^2 - B_\psi(\Phi) \bar{\psi} \widehat{D}\psi + \dots \right\} .$$

$$B_i(\Phi) = e^{-2\Phi} + c_0^{(i)} + c_1^{(i)} e^{2\Phi} + c_2^{(i)} e^{4\Phi} + \dots$$

E.S. Fradkin and A.A. Tseytlin, Phys. Lett. **B158**, 316 (1985).

C.G. Callan, D. Friedan, E.J. Martinec and M.J. Perry, Nucl. Phys. **B262**, 593 (1985).

C.G. Callan, I.R. Klebanov and M.J. Perry, Nucl. Phys. **B278**, 78 (1986).

Tree-level form:

$$S_{\text{tree}} = \int d^4x \sqrt{\hat{g}} e^{-2\Phi} \{ (\alpha')^{-1} [\hat{R} + 4\Box\Phi - 4(\widehat{\nabla}\Phi)^2] \}$$

JBD gravity と一致

## 採用模型

$$F = 1 + f\left(\frac{\chi}{M_{\text{P}}}\right)^2, \quad f > 0,$$

$$V_{\text{J}} = V_0 \left( d_4 \left(\frac{\chi}{M_{\text{P}}}\right)^4 + d_2 \left(\frac{\chi}{M_{\text{P}}}\right)^2 + 1 \right), \quad d_4 V_0 > 0.$$

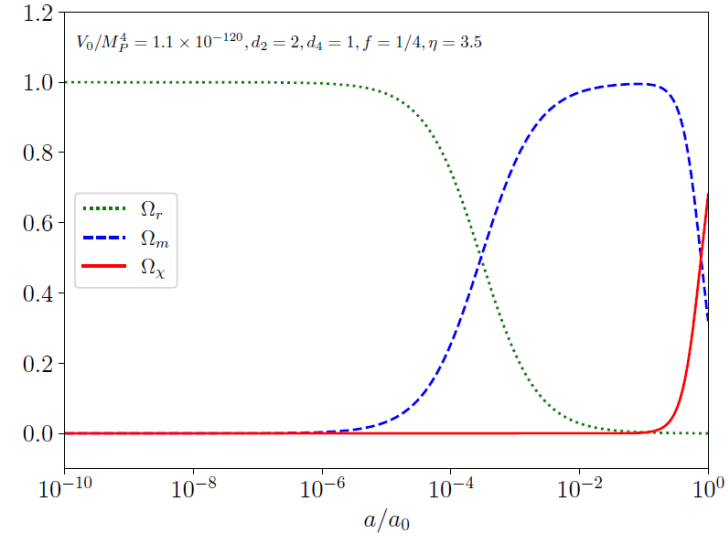


Figure 2: Time evolutions of energy densities of radiation, matter, and eJBD field  $\chi$  at epochs of  $z = 10^{10} \sim 0$ . Assumed model parameters are  $V_0/M_{\text{P}}^4 = 1.1 \times 10^{-120}$  (corresponding to  $V_0 = (2.5\text{meV})^4$ ),  $d_2 = 2, d_4 = 1, f = 1/4, \eta = 3.5$  ( $\delta = 1.5$ ).

元素合成以降の観測的宇宙論等からの F-power への制約

Oklo, quasar 吸収線、元素合成、など。

最も厳しい制約は、原子の時計遷移の年オーダーの時間変化：

QED 微細構造定数から

$$|p_g/\delta| < 0.7 \times 10^{-7}$$

T. Rosenband et al. *Science* **319**, 1808 (2008),  
and online supplementary materials (<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/1154622/DC1>).

# いかに検証するか

1. 現宇宙ではほぼゼロ質量のスカラー粒子交換による力が存在する。 重力よりやや弱い第5の力として振る舞い、測定できる可能性がある。
2. Accelerating hierarchy: 陽子崩壊に関わるゲージX粒子、QCD アクシオンに関わるPQ-symmetry breaking scale が、従来の予測値より大きくなり、観測値に影響を与える。逆に、これらが発見されれば、ストリング理論への知見を与える。
3. 無次元基礎定数の時間変化測定を精密化することにより、アイデアを実証するか、制約を厳しくできる。