

気がついたら益川さんの研究を追っていた。
KMとニュートリノ、BKMUとCoset Space
Unification、それから・・・

佐藤丈（横浜国立大学）



佐藤丈

1991年4月京大素研所属

1996年3月 博士修了

幸せな時代！？！？！？

益川さん

1990年11月京大素研所属

1997年1月 基研へ

1. 益川さん

ノーベル物理学賞受賞者

Progress of Theoretical Physics, Vol. 49, No. 2, February 1973

***CP*-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction**

Makoto KOBAYASHI and Toshihide MASKAWA

Department of Physics, Kyoto University, Kyoto



実家でも…



お祝いの会での写真

- 当時の院生にとっては

秋の風物詩



NO IMAGE

研究室で記者の方たちにKMの研究について語る益川さん

- 当時の院生にとっては

白浜での研究室合宿の一コマ



白浜の露天風呂



セミヌードで海を見つめる益川さん

小林一益川

PTP49 652 - 657, 1973

652

Progress of Theoretical Physics, Vol. 49, No. 2, February 1973

***CP*-Violation in the Renormalizable Theory
of Weak Interaction**

Makoto KOBAYASHI and Toshihide MASKAWA

Department of Physics, Kyoto University, Kyoto

(Received September 1, 1972)

In a framework of the renormalizable theory of weak interaction, problems of *CP*-violation are studied. It is concluded that no realistic models of *CP*-violation exist in the quartet scheme without introducing any other new fields. Some possible models of *CP*-violation are also discussed.

小林一益川

- 主に今で言う二世代模型 (quartet model) を考察

4 quarks 電荷は Q $Q-1$ $Q-1$ Q -- 今で言う u d s c の順

当時はLeft-handed quarkはSU(2)doubletである必要はなかった???

同様にRH quarkはSU(2)singletである必要はなかった???

なぜQ?

A) $4 = 2 + 2,$

$q_L \& q_R$

B) $4 = 2 + 1 + 1,$

doublet or singlet that is the question

C) $4 = 1 + 1 + 1 + 1$

9の可能性、実際は4つ。 $(A, A), (A, B), (A, C)$ and (B, B)

現代流は (A, C) 。最初に考察

小林一益川

- ノーベル賞の話は最後に
P657

Next we consider a 6-plet model, another interesting model of CP -violation. Suppose that 6-plet with charges $(Q, Q, Q, Q-1, Q-1, Q-1)$ is decomposed into $SU_{\text{weak}}(2)$ multiplets as $2+2+2$ and $1+1+1+1+1+1$ for left and right components, respectively. Just as the case of (A, C) , we have a similar expression for the charged weak current with a 3×3 instead of 2×2 unitary matrix in Eq. (5). As was pointed out, in this case we cannot absorb all phases of matrix elements into the phase convention and can take, for example, the following expression:

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \cos \theta_3 & -\sin \theta_1 \sin \theta_3 \\ \sin \theta_1 \cos \theta_2 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_2 \sin \theta_3 e^{i\delta} & \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + \sin \theta_2 \cos \theta_3 e^{i\delta} \\ \sin \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \theta_2 \sin \theta_3 e^{i\delta} & \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 - \cos \theta_2 \sin \theta_3 e^{i\delta} \end{pmatrix}.$$

ニュートリノ振動実験を通してCPVを！

- ニュートリノがBSMの鍵になると思っていた
- 宇宙線研に雇われた。
実験に近いところを研究してみたかった。
- KMが身近だった



幸い誰も考えていなかった

VOLUME 55, NUMBER 3

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 56, NUMBER 5

1 SEPTEMBER 1997

***CP* and *T* violation tests in neutrino oscillation**

Jiro Arafune^{*} and Joe Sato[†]

***CP* violation and matter effect in long baseline neutrino oscillation experiments**

Jiro Arafune,^{*} Masafumi Koike,[†] and Joe Sato[‡]

$$\nu_\alpha = U_{\alpha i}^{(0)} \nu'_i .$$

MNSとすら呼ばれていない時代
混合が大きいのでフレーバーの添え字と質量の添え字は峻別

$$U^{(0)} = e^{i\psi\lambda_7} \Gamma e^{i\phi\lambda_5} e^{i\omega\lambda_2}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\psi & s_\psi \\ 0 & -s_\psi & c_\psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\delta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_\phi & 0 & s_\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\phi & 0 & c_\phi \end{pmatrix}$$

$$\times \begin{pmatrix} c_\omega & s_\omega & 0 \\ -s_\omega & c_\omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} c_\phi c_\omega & c_\phi s_\omega & s_\phi \\ -c_\psi s_\omega - s_\psi s_\phi c_\omega e^{i\delta} & c_\psi c_\omega - s_\psi s_\phi s_\omega e^{i\delta} & s_\psi c_\phi e^{i\delta} \\ s_\psi s_\omega - c_\psi s_\phi c_\omega e^{i\delta} & -s_\psi c_\omega - c_\psi s_\phi s_\omega e^{i\delta} & c_\psi c_\phi e^{i\delta} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

KMとは違うパラメタ化

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \cos \theta_3 & -\sin \theta_1 \sin \theta_3 \\ \sin \theta_1 \cos \theta_2 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_2 \sin \theta_3 e^{i\delta} & \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + \sin \theta_2 \cos \theta_3 e^{i\delta} \\ \sin \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \theta_2 \sin \theta_3 e^{i\delta} & \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 - \cos \theta_2 \sin \theta_3 e^{i\delta} \end{pmatrix}.$$

最近は

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\alpha i} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Flavor eigenstates

Atmospheric ν ,
Accelerator ν experiments
(K2K, MINOS, T2K..)

Reactor ν ,
Accelerator ν ,
Atm. ν

Solar ν ,
Reactor
 ν

Mass eigenstates

$\theta_{23} \sim 45^\circ$
 $\Delta m^2_{23} \sim 2.5 \times 10^{-3} (\text{eV}^2)$

$\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.025$

$\sin^2 \theta_{12} \sim 0.31$
 $\Delta m^2_{12} \sim 7.5 \times 10^{-5} (\text{eV}^2)$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \cdot \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \cdot \sin^2 \Phi_{ij} \pm 2 \cdot \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \cdot \sin^2 2\Phi_{ij}$$

$$\sin^2 2\Phi_{ij} = \Delta m_{ij}^2 L / 4E = 1.27 \times m_{ij}^2 (\text{eV}^2) L(\text{km}) / E(\text{GeV})$$

$\alpha = \beta$: Disappearance , $\alpha \neq \beta$: Appearance

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$$

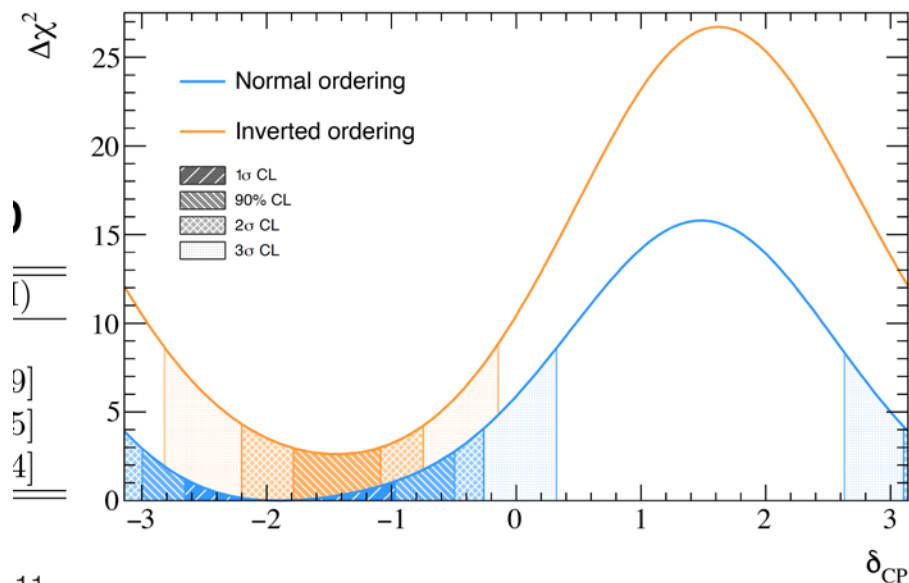
$$= \delta_{\alpha\beta} - 4 \cdot \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \cdot \sin^2 \Phi_{ij} \pm 2 \cdot \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \cdot \sin^2 2\Phi_{ij}$$

$$\sin^2 2\Phi_{ij} = \Delta m_{ij}^2 L / 4E = 1.27 \times m_{ij}^2 (\text{eV}^2) L(\text{km}) / E(\text{GeV})$$

$\alpha = \beta$: Disappearance , $\alpha \neq \beta$: Appearance

三世代ではただ一つの値。
Jarlskog Invariant

T2K preliminary Run1-10



ニュートリノで拓く素粒子と宇宙 2022/3/7-8
A02班 栗林さんのスライドより

超対称性理論における非線形表現

Progress of Theoretical Physics, Vol. 72, No. 2, August 1984

Non-Linear Realization in Supersymmetric Theories

Masako BANDO, Tetsuji KURAMOTO, Toshihide MASKAWA[†]
and Shozo UEHARA

Progress of Theoretical Physics, Vol. 72, No. 6, December 1984

Non-Linear Realization in Supersymmetric Theories. II

Masako BANDO, Tetsuji KURAMOTO, Toshihide MASKAWA[†] and Shozo UEHARA^{*})

[Physics Letters B](#)

[Volume 138, Issues 1–3, 12 April 1984, Pages 94-98](#)

超対称性理論における非線形表現

- 板東さんに学生の頃聞く。何のことか理解せず。
- 柳田さんと $E7/SU(5) * U(1)^3$ の現象論。実はこれらしいと
- 同じ頃九後さんの賢島での講義
- Ito Kugo Kunitomo なんとなく分かる気が
- BKMU も Buchmuller Peccei Yanagida も 分からん
- 最近また勉強を再開。

超対称性理論における非線形表現

非線形表現

$$\xi = \exp i\phi^a T_a$$

G/H

場はここに現れる。 もともとは実数。背後にある対称性



超対称性 = 超場 = > 複素数

対称性の複素化

$$G \rightarrow G^c \quad H \rightarrow H^c$$



超対称性 = 真空のエネルギーが厳密に 0

残る対称性が持ち上がる

$$H^c \rightarrow \hat{H}$$



超対称性 = 「NG」モードは 2 倍

P(Pure), M(Mixed){場}、A,B,C-type Lagrangian

超対称性理論における非線形表現

変換性 $\xi' \in G^c/\hat{H}$ and $\hat{h} \in \hat{H}$,

$$g\xi = \xi'(\xi, g)\hat{h}(\xi, g)$$



$$\begin{aligned}\xi^\dagger \xi &\rightarrow \xi'^\dagger \xi' = \hat{h}^{-1\dagger}(\xi^\dagger, g)\xi^\dagger g^\dagger g\xi \hat{h}^{-1}(\xi, g) \\ &= \hat{h}^{-1\dagger}(\xi^\dagger, g)\xi^\dagger \xi \hat{h}^{-1}(\xi, g).\end{aligned}$$

**単純にトレースをとれば
よいというわけではない**



超対称性特有の性質 (真空 = 0 エネルギーなど)

射影演算子 \Rightarrow A,B,C-type Lagrangian

超対称性理論における非線形表現

$$r = \left\{ \begin{array}{ccc|c} & l & m & n \\ \left[\begin{array}{ccc} 0 & t_{lm} & t_{ln} \\ 0 & 0 & t_{mn} \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right] & l & m & n \end{array} \right\},$$

ここに対応する部分をとってあげればよい

取り方に不定性
指針はなさそう

$$\hat{h}^{\max} = \left\{ \begin{array}{ccc|c} & l & m & n \\ \left[\begin{array}{ccc} h_l & t_{lm} & t_{ln} \\ 0 & h_m & t_{mn} \\ 0 & 0 & h_n \end{array} \right] & l & m & n \end{array} \right\}.$$

超対称性理論における非線形表現

Large lepton mixing in a coset-space family unification on
 $E_7/SU(5) \times U(1)^3$

J. Sato¹, T. Yanagida²

現象論的にうまくいきそう！？

現象論的に導入した粒子を考えると実は $E_8/SU(5) \times U(1)^3$

さらに

Aiming for Unification of L_μ - L_τ and the standard model gauge group

学生の声を聞く

- 研究室会議などでは学生の意見を聞こうとしてくれていた。
発言を我慢。自分もそう努めているがなかなか。
- 2000年ころ学研都市での研究会で
「君はその研究に命を懸けているのか？」 深い(?) 問い
- 益川塾
うちの元学生がお世話になりました。

学生の声を聞く

- 研究室会議などでは学生の意見を聞こうとしてくれていた。
発言を我慢。自分もそう努めているがなかなか。
- 益川塾（京都産業大学）
うちの元学生がお世話になりました。



益川さんと曾我見さん（京都産業大学）



益川さんと曾我見さん（京都産業大学）

ご冥福をお祈りいたします