

南部陽一郎氏ノーベル物理学賞受賞記念シンポジウム

素粒子論における対称性の自発的破れの物理とその発展

南部先生のノーベル賞受賞業績について

細谷 裕 （阪大理）

日本物理学会第64回年次大会（立教大学 2009年3月27日）

The Nobel Prize in Physics 2008

Yoichiro Nambu

*The Discovery of
the Mechanism of Spontaneous Broken Symmetry
in Subatomic Physics*

素粒子論における対称性の自発的破れ

Original scientific articles:

Y. Nambu, G. Jona-Lasinio:

“Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity. I”, Physical Review 122 (1961) p. 345 - 358.

“Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity. II”, Physical Review 124 (1961) p. 246 - 254.

The Royal Swedish Academy of Sciences

超伝導

BCS (July 1957), Bogoliubov (1958)
(Ginzburg-Landau, 1950)

南部の超伝導理論 (July 1959)

NJL理論 (Apr. & Oct. 1960, May 1961)

素粒子の世界の新しい描像
対称性の自発的破れ

カイラル対称性の自発的破れ

質量の生成

Pionの物理、PCAC

統一ゲージ理論への道

電弱統一理論、GUT、SUSY、...

南部の超伝導理論 (July 1959)

Y. Nambu,

“Quasi-Particles and Gauge Invariance in the Theory of Superconductivity”,
Physical Review 117 (1960) p. 648 - 663.

NJL理論 (Apr. & Oct. 1960, May 1961)

Y. Nambu,

“A ‘Superconductor’ Model of Elementary Particles and its Consequences”,
Proceedings of the Midwest Conference on Theoretical Physics,
Purdue Univ., 1 - 2 April 1960, p. 1.

Y. Nambu and G. Jona-Lasinio,

Physical Review 122 (1961) p. 345 - 358.

Physical Review 124 (1961) p. 246 - 254.

超伝導

BCS理論

Cooper pairs

$$\text{BCS基底状態: } |\Psi_{\text{BCS}}(\alpha)\rangle = \prod \left\{ u_p + e^{i\alpha} v_p c_e^\dagger(\vec{p}, \uparrow) c_e^\dagger(-\vec{p}, \downarrow) \right\} |0\rangle$$

電荷の固有状態でない!!

U(1)対称性が自発的に破れる?

or

$$|\Psi_N\rangle = \int d\alpha e^{-iN\alpha/2} |\Psi_{\text{BCS}}(\alpha)\rangle \quad \text{電荷の固有状態}$$

$$|\Psi\rangle = \sum \sqrt{w_N} |\Psi_N\rangle$$

Quasi-particles (準粒子)

$$|\Psi_{\text{BCS}}(\alpha)\rangle = \prod \left\{ u_p + e^{i\alpha} v_p c_e^\dagger(\vec{p}, \uparrow) c_e^\dagger(-\vec{p}, \downarrow) \right\} |0\rangle$$

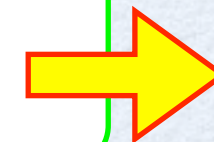
$$\xi(\vec{p}, \uparrow) = u_p c_e(\vec{p}, \uparrow) - e^{i\alpha} v_p c_e^\dagger(-\vec{p}, \downarrow)$$

$$\xi(-\vec{p}, \downarrow) = u_p c_e(-\vec{p}, \downarrow) + e^{i\alpha} v_p c_e^\dagger(\vec{p}, \uparrow)$$

Bogoliubov (1958)

$$\xi(\vec{p}, \uparrow) |\Psi_{\text{BCS}}(\alpha)\rangle = 0$$

Energy gap $\Delta(p)$



超伝導

基底状態は準粒子の真空

準粒子は粒子とホールの混合 - U(1)対称性の破れ

エネルギー・ギャップの生成

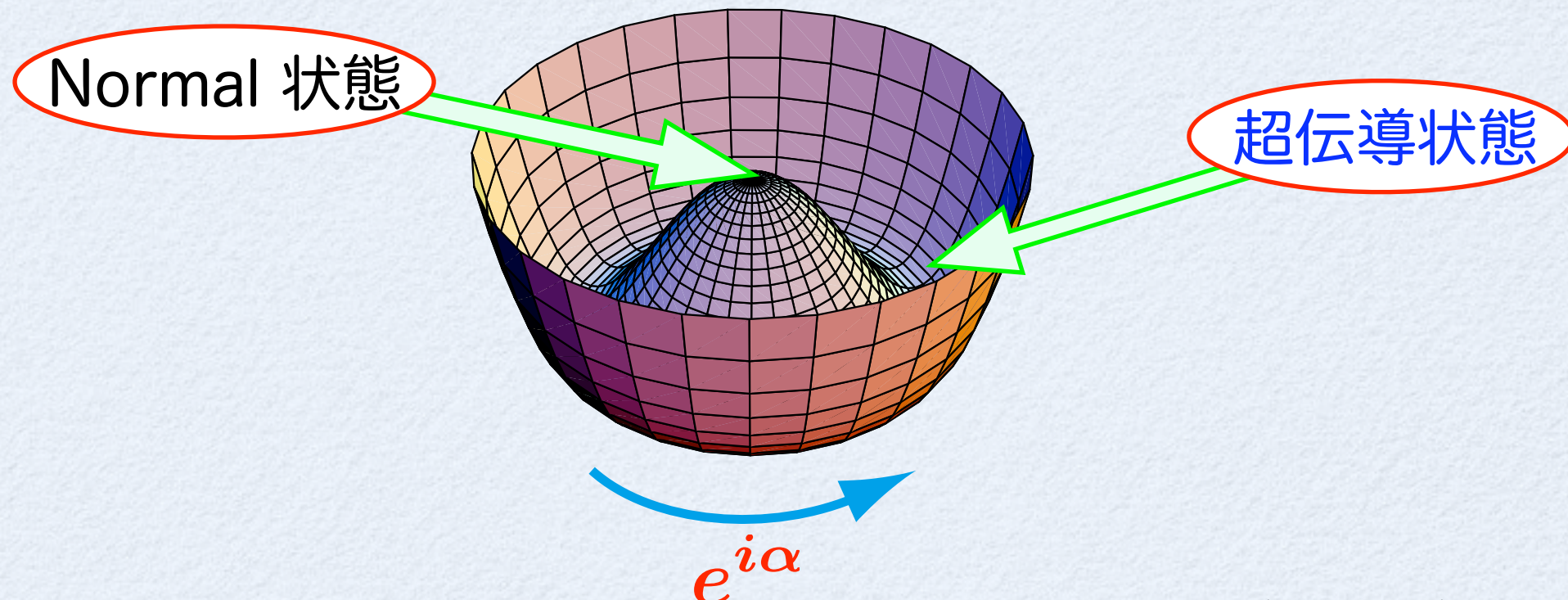
Cooper pairs の凝縮

$$\langle \Psi_{\text{BCS}}(\alpha) | \psi_{\downarrow}(x) \psi_{\uparrow}(x) | \Psi_{\text{BCS}}(\alpha) \rangle = e^{i\alpha} \sum u_p v_p$$

$$= \Psi_{\text{GL}}$$

Ginzburg-Landau の order parameter

エネルギー $\mathcal{E}(\Psi_{\text{GL}})$



南部の超伝導理論

場の理論による理解

generalized Hartree-Fock 近似
非摂動的な解

$$H = H_0 + H_{\text{int}} \quad \leftarrow \text{U(1)対称性を持つ}$$

$$= (H_0 + H_s) + (H_{\text{int}} - H_s)$$

H'_0



U(1)対称性をこわす

H'_{int}

Feynman-Dyson

基底状態の対称性 < ハミルトニアンの対称性

自発的対称性の破れ

$$H = H_0 + H_{\text{int}}^{\text{phonon}} + H_{\text{int}}^{\text{Coulomb}}$$

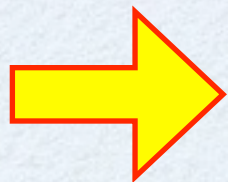
$$H_{\text{int}}^{\text{phonon}} = \text{diagram} \sim \text{diagram} \sim \int d^3x \frac{g}{2} \psi_a^\dagger \psi_b^\dagger \psi_b \psi_a$$

$$H_s = \int d^3x g \left\{ \langle \psi_2^\dagger \psi_1^\dagger \rangle \psi_1 \psi_2 + \psi_2^\dagger \psi_1^\dagger \langle \psi_1 \psi_2 \rangle \right\}$$

$$(1 = \uparrow, 2 = \downarrow)$$

$$\langle \Psi_N | \psi_1 \psi_2 | \Psi_{N+2} \rangle \Rightarrow \langle \Psi(\alpha) | \psi_1 \psi_2 | \Psi(\alpha) \rangle$$

Gorkov (1958)



$$H'_0 \sim (\epsilon + \chi) \psi_a^\dagger \psi_a + \phi (\psi_1 \psi_2 + \psi_2^\dagger \psi_1^\dagger)$$

南部表示

$$\Psi(x) = \begin{pmatrix} \psi_1(x) \\ \psi_2^\dagger(x) \end{pmatrix} \quad \Psi(\vec{p}) = \begin{pmatrix} \psi_1(\vec{p}) \\ \psi_2^\dagger(-\vec{p}) \end{pmatrix}$$

$$H'_0 = \sum_{\vec{p}} \Psi^\dagger(\vec{p}) \left\{ \epsilon(\vec{p}) \tau_3 + \chi(\vec{p}) \tau_3 + \phi(\vec{p}) \tau_1 \right\} \Psi(\vec{p})$$

Σ *gap*

$$E(\vec{p}) = \pm \sqrt{(\epsilon + \chi)^2 + \phi^2}$$



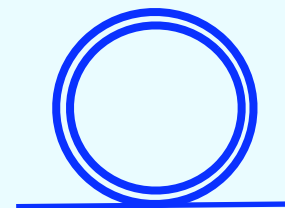
Dirac's Hamiltonian

$$H = \vec{p} \cdot \vec{\alpha} + m\beta$$

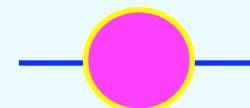
質量

Self-consistency:

$$H'_{\text{int}} = H_{\text{int}} - H_s \sim 0$$



—



= 0

Σ

Collective mode

$$H_{\text{int}}^{\text{phonon}} + H_{\text{int}}^{\text{Coulomb}} = \text{diagram 1} + \text{diagram 2} = \text{diagram 3}$$

$$\text{diagram 4} = \text{diagram 5} + \text{diagram 6} + \text{diagram 7} + \dots$$

$H_{\text{int}}^{\text{Coulomb}} = 0$ のとき

gapless mode

U(1)カレント保存 $\Rightarrow$ NGボゾン

$H_{\text{int}}^{\text{Coulomb}} \neq 0$ のとき

$$q_0 \sim \sqrt{\frac{4\pi n e^2}{m}}$$

plasmon (massive mode)

ヒッグス機構の前兆

南部の描像

超伝導体の中の世界

BCS基底状態

Cooper 対の凝縮
電荷の固有状態ではない
対称性は破れている

励起モード：準粒子

Collective mode (plasmon)

超伝導体の外から見る世界

電子



素粒子の世界

真空

空っぽではない

対称性は破れている

粒子

NGボゾン

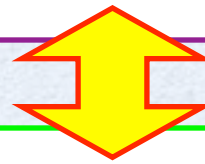


考える必要なし

NJL理論

超伝導

$$\left\{ p_0 - (\epsilon + \chi)\tau_3 - \phi \tau_1 \right\} \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2^\dagger \end{pmatrix} = 0$$



Dirac 方程式

$$\left\{ p_0 - \begin{pmatrix} \vec{p}\vec{\sigma} & \\ & -\vec{p}\vec{\sigma} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} & m \\ m & \end{pmatrix} \right\} \begin{pmatrix} \psi_R \\ \psi_L \end{pmatrix} = 0$$

gap ϕ $\longleftrightarrow$ 質量 m

U(1)電荷対称性 カイラル対称性

$$\psi \rightarrow e^{i\alpha\gamma^5} \psi$$

$$\gamma^5 = \begin{pmatrix} I & \\ & -I \end{pmatrix}$$

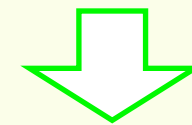
カイラル対称性の自発的破れ $\Rightarrow$ 核子の質量生成

カイラル対称性

質量項 $m \bar{\psi}\psi = m(\psi_L^\dagger \psi_R + \psi_R^\dagger \psi_L)$: カイラル対称性を破る

ハドロンの基本相互作用
(強い相互作用)

カイラル対称性をもつ



自発的に破れる

QCD

4-fermi int. $\mathcal{L}_{\text{int}} = g_0 \left\{ (\bar{\psi}\psi)^2 - (\bar{\psi}\gamma^5\psi)^2 \right\}$
 $= 4g_0 \psi_L^\dagger \psi_R \psi_R^\dagger \psi_L$

$$\begin{aligned}
\mathcal{L} &= \mathcal{L}_0 + \mathcal{L}_{\text{int}} \\
&= (\mathcal{L}_0 + \mathcal{L}_s) + (\mathcal{L}_{\text{int}} - \mathcal{L}_s)
\end{aligned}$$

$\mathcal{L}'_0$ $\mathcal{L}'_{\text{int}}$
 $\swarrow$
 $-m \bar{\psi} \psi$

Self-consistency:

$$\mathcal{L}'_{\text{int}} \sim 0 \quad \Rightarrow \quad \text{---} \times \text{---} + \text{---} \bigcirc \text{---} = 0$$

$$m \left\{ 1 + \frac{ig_0}{2\pi^4} \int \frac{d^4 p}{p^2 + m^2 - i\epsilon} \right\} = 0$$

$$0 < \frac{2\pi^2}{g_0 \Lambda^2} < 1 \quad \text{のとき} \quad \text{非摂動解} (m \neq 0)$$

NJL真空

$$|\Omega^{(m)}(\alpha)\rangle = \prod \left\{ u_p + e^{is\alpha} v_p a^{(0)}(\vec{p}, s)^\dagger b^{(0)}(-\vec{p}, s)^\dagger \right\} |0\rangle$$

粒子 反粒子
chiral pairs

核子(クォーク) $a^{(m)}(\vec{p}, s) = u_p a^{(0)}(\vec{p}, s) - e^{is\alpha} v_p b^{(0)}(-\vec{p}, s)^\dagger$

電子

$$\text{BCS基底状態: } |\Psi_{\text{BCS}}(\alpha)\rangle = \prod \left\{ u_p + e^{i\alpha} v_p c_e^\dagger(\vec{p}, \uparrow) c_e^\dagger(-\vec{p}, \downarrow) \right\} |0\rangle$$

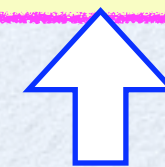
Cooper pairs

準粒子 $\xi(\vec{p}, \uparrow) = u_p c_e(\vec{p}, \uparrow) - e^{i\alpha} v_p c_e^\dagger(-\vec{p}, \downarrow)$

カイラル・カレントの保存 collective mode

$$j^{5\mu} = \bar{\psi} \gamma^\mu \gamma^5 \psi, \quad \partial_\mu j^{5\mu} = 0$$

$$\langle p' | j^{5\mu} | p \rangle = F(q^2) \bar{u}(p') \left\{ \gamma^\mu \gamma^5 + \frac{2mq^\mu}{q^2} i\gamma^5 \right\} u(p)$$



南部-Goldstoneの定理

massless 0^- 粒子 : pion

$$= \text{diagram 1} + \text{diagram 2} + \text{diagram 3} + \dots$$

$$= 2g_0 i \gamma^5 \frac{1}{1 - J_P(q^2)} \gamma^5$$

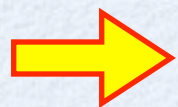
$$J_P(0) = \cancel{0} \underset{1}{1} \text{ from self-consistency}$$

現実の世界

(NJL 2)

$\left\{ \begin{array}{l} \gamma^5 \times \text{isospin 対称性} \\ \text{small bare mass (カイラル対称性の小さな破れ)} \end{array} \right.$

massless NG boson $\rightarrow$ 小さな質量 $m_\pi^2 \ll m^2$



$$f_\pi^2 m_\pi^2 = \frac{m_u + m_d}{2} \langle \bar{u}u + \bar{d}d \rangle$$

Gell-Mann, Oaks, Renner 1968

Chiral condensates (カイラル対の凝縮)

$$\langle \bar{q}q \rangle \sim (250 \text{ MeV})^3$$

lattice simulation JLQCD-TWQCD 2007

南部の描像

超伝導体の中の世界

BCS基底状態

Cooper 対の凝縮

対称性は破れている

準粒子

Collective mode



素粒子の世界

真空

空っぽではない

対称性は破れている

粒子

NGボゾン

統一理論への道

基本理論

高い隠れた対称性

対称性の自発的破れ

観測される世界

真空：真に空っぽではない
粒子 = 準粒子

超弦理論

GUT

電弱統一理論

SUSY

強い相互作用
電磁相互作用 弱い相互作用
重力