

# 南部先生と 自発的対称性の破れ



2月6日金茶会 北澤良久

# 物理法則の対称性

- 操作のもとの不変性 Weyl

空間並進

時間並進

空間回転

ローレンツブースト

同種粒子の交換

CPT変換

時間反転 T

空間反転 P

粒子・反粒子の交換 C

波動間数の位相シフト

# 対称性と保存則

- 量子力学において、対称性には保存量が付随する Wigner

空間並進	↔	運動量
時間並進	↔	エネルギー
空間回転	↔	角運動量
波動関数の位相シフト	↔	電荷

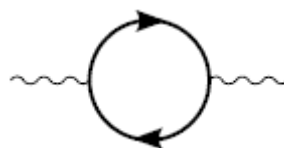
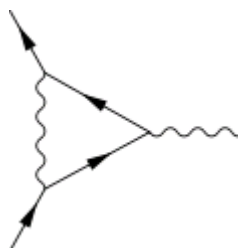
# CP非保存

- Fitch-Cronin 1964
- 小林・益川理論 1972  
究極の湯川モード  
↕  
Einstein モード  
Dirac モード
- 日光の逆柱 (ファインマンレクチャー)



# 量子電磁力学

- 朝永・Schwinger・Feynman 1947
- 電子・陽電子とフォトンの場の理論
- 場の理論：無限自由度の量子力学
- ファインマンダイアグラム



# 物性物理学の進展

- 2次元イジング模型の厳密解

Onsager 1944 南部 1949

- 電子ガスへの場の理論の適応

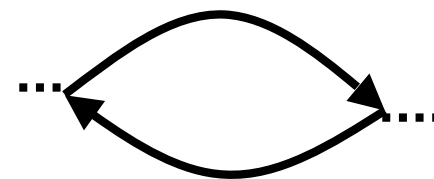
プラズモン(プラズマ振動) Bohm, Pines 1953

クーロン力の遮蔽効果

フォノン(マスレスモード)

低エネルギー自由度:

電動電子と音波(フォノン)



リングダイアグラム

# 南部先生の経歴

東大 1946

朝永グループ

大阪市立大 1950

山口・西島・早川

V-particles

IAS (Princeton) 1952

Pauli, Dyson, Lee, Yang

“吾よりも他人がえらく見える  
日よ”

木下: Bohm Pines theory

Univ. Chicago 1954

Goldberger, Miyazawa

Professor 1958

Kubo, Koshihara, Sakurai

Professor Emeritus 1991

# 超伝導

- Kamerlingh Onnes 電気抵抗消滅 1911
- Meissner 効果 1933
- Ginzburg-Landau 有効理論 1950

Free energy density

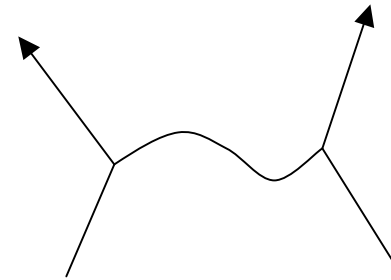
$$\frac{1}{4m} \left| \frac{\partial \Psi}{\partial \vec{r}} \right|^2 - 2ie\vec{A}\Psi|^2 - a|\Psi|^2 + \frac{1}{2}b|\Psi|^4 + \frac{1}{8\pi}(\text{rot}\vec{A})^2$$

- Bardeen, Cooper, Schrieffer 理論 1957

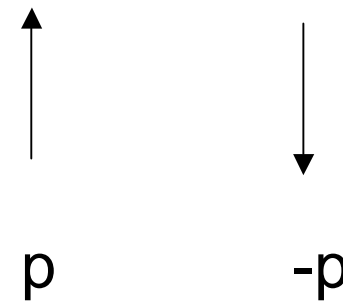


# BCS理論

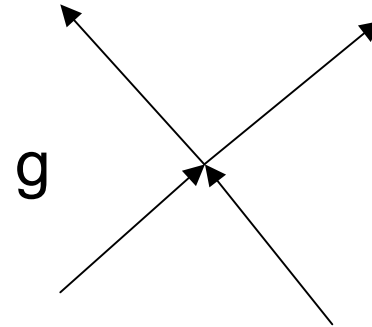
- 電子間にフォノンの交換による引力が働く
- フェルミ面近傍の電子対がフォノンによる引力によりクーパーペアを作る
- クーパーペアが凝縮(異なる粒子数の波動関数の位相がそろった重ね合わせ)



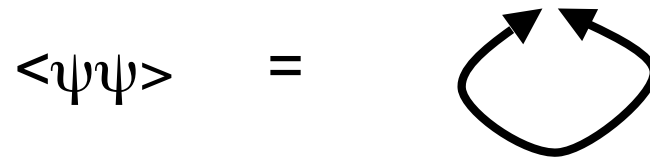
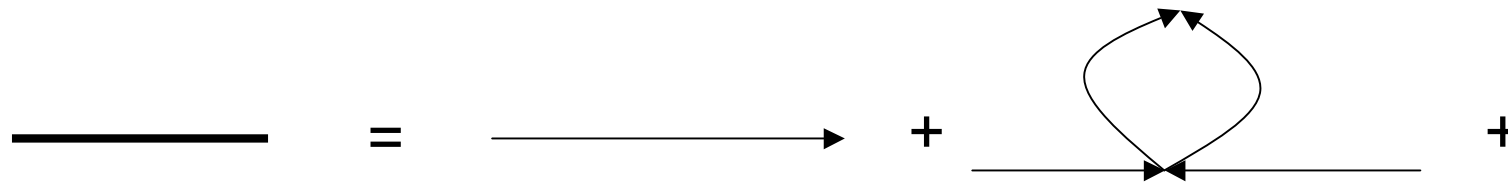
クーパーペア



# フォノンによる相互作用



## プロパゲーター



エネルギーギャップ

$$\Delta \sim T_D \exp(-1/gN)$$

任意の弱結合で起こる

# 南部先生の疑問

- Schrieffer が Chicago 大でセミナー 1957
- BCS理論の帰結に感銘を受けるが、対称性 (粒子数保存則) を破っていることに疑問を抱く
- 数年間の考察の後、BCS理論の正当性を確信
- マスレスモードが存在しカレント保存則を回復することを発見

# ハドロンの対称性

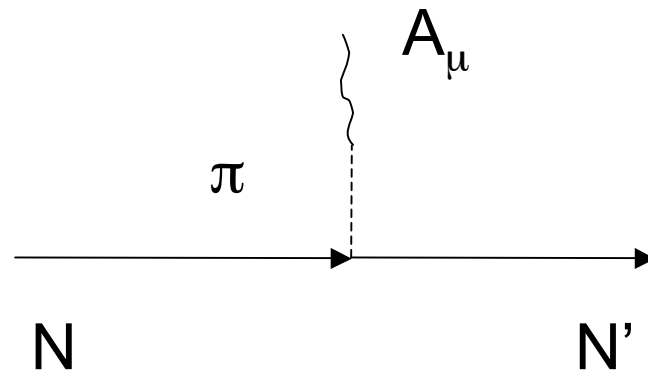
- アイソスピン (p,n) ( $\pi^+, \pi^0, \pi^-$ )
- Feynman and Gell-mann V - A theory 1958
- Conserved Vector Current: V
- Partially Conserved Axial Current: A
- Goldberger Treiman relation
- カレント代数

$$SU(2)_L \times SU(2)_R$$

$$L = V - A, \quad R = V + A$$

In the chiral limit, the axial current is conserved

$$\langle N | A_\mu | N' \rangle = \overline{N} (\gamma_\mu \gamma_5 g_a + q_\mu \gamma_5 h) N'$$



Massless pion contribution restores current conservation

↓

Goldberger-Treiman relation:  $g_a m_N = g_{\pi NN} f_\pi$

# カイラル対称性

- 質量のないフェルミ粒子は、運動方向のスピンが保存(カイラリティ)
- 左巻き(L)と右巻き(R)粒子のそれぞれの波動関数の位相を独立に回転できる
- ハドロンの対称性は、基本粒子(クォーク)の質量が軽いことを示唆
- カイラル極限でパイオンはマスレス

# History repeats itself

*1960 Midwest Conference in Theoretical Physics, Purdue University*

## A 'SUPERCONDUCTOR' MODEL OF ELEMENTARY PARTICLES AND ITS CONSEQUENCES by Y. Nambu (University of Chicago)<sup>†</sup>

(In absence of the author the paper was presented by G. Jona-Lasinio.)

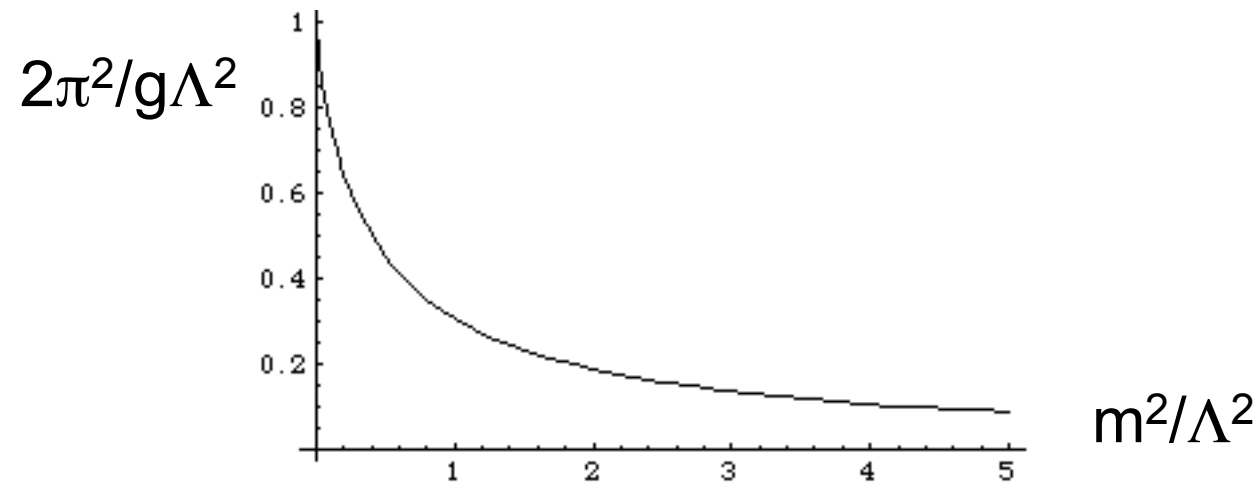
### 1

In recent years it has become fashionable to apply field-theoretical techniques to the many-body problems one encounters in solid state physics and nuclear physics. This is not surprising because in a quantized field theory there is always the possibility of pair creation (real or virtual), which is essentially a many-body problem. We are familiar with a number of close analogies between ideas and problems in elementary particle theory and the corresponding ones in solid state physics. For example, the Fermi sea of electrons in a metal is analogous to the Dirac sea of electrons in the vacuum, and we speak about electrons and holes in both cases. Some people must have thought of the meson field as something like the shielded Coulomb field. Of course, in elementary particles we have more symmetries and invariance properties than in the other, and blind analogies are often dangerous.

# Nambu Jona-Lasinio Model

4 fermi interaction with chiral invariance

$$\langle \bar{\psi}_L \psi_R \rangle = \text{[Feynman diagram: a loop with an arrow pointing clockwise, representing a fermion loop.]}$$



the coupling must be strong enough  
Massless “pion” also appears



# 予想以上の類似性

- 対称性の自発的破れは、無限自由度の量子系に普遍的な現象
- ハドロンの対称性の本質を解明
- 超電動体では、南部・ゴールドストーン粒子が電磁場の縦波モードとなって電磁場に質量を与える(マクスナー効果)
- Weinberg-Sala 模型において、ゲージ場に質量を与える機構(Higgs機構)として活用:

## Nambu's comment

Y. Nambu, preliminary Notes for the Nobel Lecture

*In hindsight I regret that I should have explored in more detail the general mechanism of mass generation for the gauge field. But I thought the plasma and the Meissner effect had already established it. I also should have paid more attention to the Ginzburg-Landau theory which was a forerunner of the present Higgs description.*

# 量子色力学

- Quark model: Gell-Mann, Zweig 1964
- Parastatistics: Greenberg 1964
- Color 量子数の導入: Han Nambu 1965  
quarkの統計問題、quark間相互作用の飽和性を解決
- Asymptotic freedom: Gross, Wilczek, Politzer 1973

As we shall see, Nambu's field theory had all the relevant details of the correct theory , but it was perhaps too early and the focus was on other problems at the time.

# 場の理論と臨界現象

- 統計力学の大問題 :  
2次相転移理論 Landau 1937
- スケール則と臨界指数  $\xi \sim (T - T_c)^{-\nu}$
- 繰り込み群による臨界現象の理解:  
K. Wilson 1972
- 臨界点近傍における場の理論の非摂動論  
的定式化
- 格子QCD: 数値シミュレーション
- 繰り込み理論の本質の解明

# 南部モード

- 物理現象の本質を捉える慧眼
- “物”の存在を確信
- 真空も“物”:  
素粒子の真空と物質の基底状態の類似性
- Quarkも“物”: color自由度の導入
- Veneziano 振幅はひも: 弦理論
- Higgs粒子も“物”:  
top condensation? tumbling?
- 時空も“物”?

# Hierarchical spontaneous symmetry breaking

Y. Nambu, *Masses as a problem and as a clue*, May 2004

*The BCS mechanism is most relevant to the mass problem because introduces an energy (mass) gap for fermions, and the Goldstone and Higgs modes as low-lying bosonic states. An interesting feature of the SSB is the possibility of hierarchical SSB or “tumbling”. Namely an SSB can be a cause for another SSB at lower energy scale.*

*... [examples are]*

*1. the chain crystal–phonon–superconductivity. ... Its NG mode is the phonon which then induces the Cooper pairing of electrons to cause superconductivity.*

*2. the chain QCD–chiral SSB of quarks and hadrons– $\pi$  and  $\sigma$  mesons–nuclei formation and nucleon pairing–nuclear  $\pi$  and  $\sigma$  modes–nuclear collective modes.*

# 強結合超伝導体

- 量子色力学: 磁気モノポール凝縮によるクォークの閉じ込め(電気と磁気の入れ替え対称性)
- 高温超伝導体: Non Fermi liquid
- 超対称可解模型:  
Seiberg, Witten, Maldacena
- I have found a formulation of the so-called BEC-BCS crossover phenomenon, and I am looking into its general implications in physics.  
(南部先生シカゴ大ホームページ)



金剛の露一粒や石の上