

アインシュタインから南部へ 真空は空っぽでない

細谷 裕 Yutaka Hosotani

大阪大学理学研究科



日本物理学会 科学セミナー2016 8/21 駒場

「対称性とその破れ」



写真：南部陽一郎



アインシュタインから 南部へ

真空は真に空っぽ~~が~~
でない

対称性 の 自発的破れ

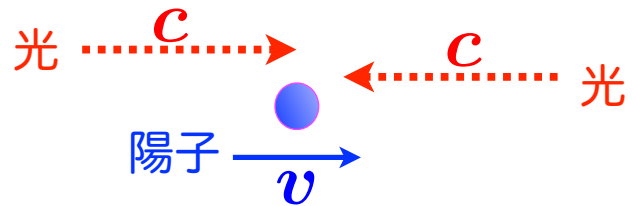
光は媒質が振動する波か？

光の速さを測ってみよう

LHCでは、陽子の速さは
(7 TeV)

$$v = c - 2.7 \text{ m/s}$$

$$c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

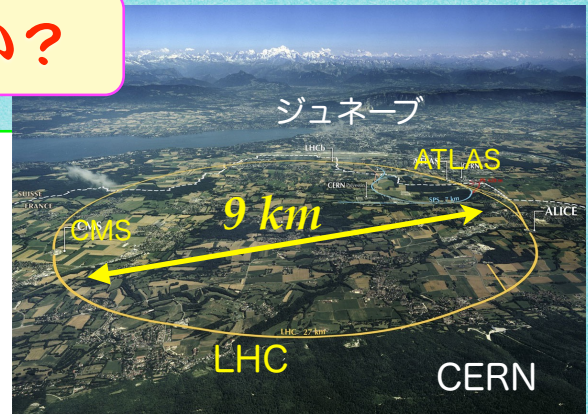


クイズ

「陽子」君が「観測する」光の速さは

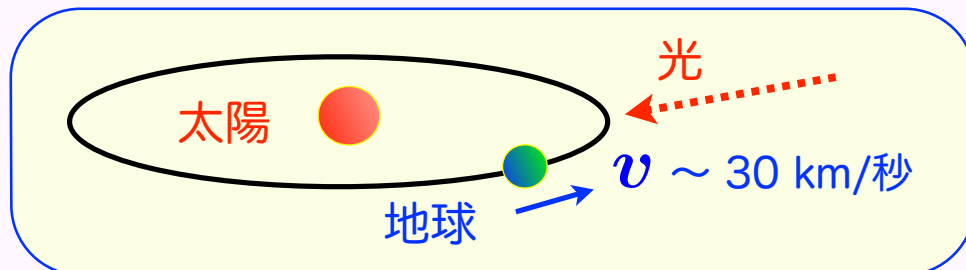
(i) $c - v = 2.7 \text{ m/s}$

(ii) c



若きアインシュタインの時代 (1900ごろ)

光は媒質 (エーテル) が振動する波か？



光の速さの差がみえない？

マイケルソン・モーリーの実験 (1887)

アインシュタイン(1905)

エーテル（媒質）は存在しない

光は電場と磁場が伝播する波

光速度は不変 + 相対性原理



実は、これも
高度な「対称性」

特殊相対性理論

アインシュタインの世界

真空： 何もない、空っぽ

光： 電磁波

粒子（光子）でもある（光量子論 1905）

物質： 力を及ぼしあり
時空を曲げる

1920ごろ

素粒子物理は simple だった

真空から見ると



電磁力

重力

1950年代

溢れる素粒子？



$e^+, \mu^-, \mu^+, \nu_e, \dots$



$n, \bar{p}, \Lambda, \Xi, \Omega^-, \dots$

$\pi^0, \pi^\pm, K^\pm, K^0, \bar{K}^0, \rho^0, \rho^\pm, \dots$

$m_e \sim 0.5 \text{ MeV}, m_\mu \sim 106 \text{ MeV}$

$m_p \sim 938 \text{ MeV}, m_n \sim 940 \text{ MeV}$

$m_\pi \sim 135 \text{ MeV}, m_\rho \sim 775 \text{ MeV}$

整理する. 素粒子は少ないほど良い.

ちょっと1964年に先回りすると

クォークモデル

(u, d, s)
 $+\frac{2}{3}e, -\frac{1}{3}e, -\frac{1}{3}e$

$p : uud$

$n : udd$

$\rho^0 : u\bar{u} - d\bar{d}$

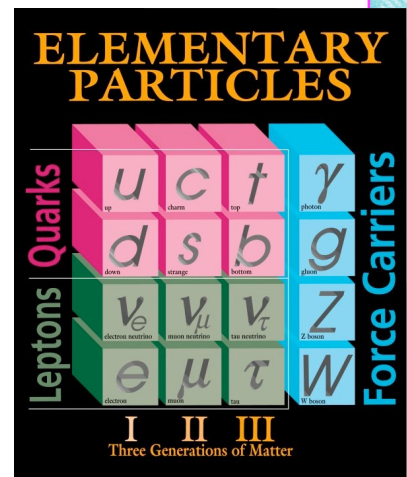
$\rho^+ : u\bar{d}$

$K^{*+} : u\bar{s}$

大雑把に

$m_u, m_d \sim 350 \text{ MeV}$

$m_s \sim 500 \text{ MeV}$



ところが

パイ中間子 $\pi^+ : u\bar{d} \sim 140 \text{ MeV}$ とても軽い？

南部の直感と洞察 (1960)

実は、 $\pi^0, \pi^\pm$ ほぼ零質量

(今でいう 南部・ゴールドストーン・ボゾン)

$$\frac{m_\pi^2}{m_\rho^2} \sim 0.03 \ll 1$$

超伝導

抵抗ゼロで電気が流れる

BCS理論 (1958)

U(1)

クーパー対

真空

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

$c_e^\dagger(\vec{p}, \uparrow)$ 運動量 $\vec{p}$ スピン $\uparrow$ の電子を作る

BCS基底状態： 電子対あり と 電子対なし の混合

電子数 (電荷) の固有状態でない !!

U(1)対称性が破れている

励起モード：準粒子 (Quasi-particles)

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

$$\xi(\vec{p}, \uparrow) = u_p c_e(\vec{p}, \uparrow) - e^{i\alpha} v_p c_e^\dagger(-\vec{p}, \downarrow) \quad \text{Bogoliubov (1958)}$$

電子を消す 電子を作る

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

BCS基底状態は準粒子の真空

エネルギー・ギャップの生成



超伝導

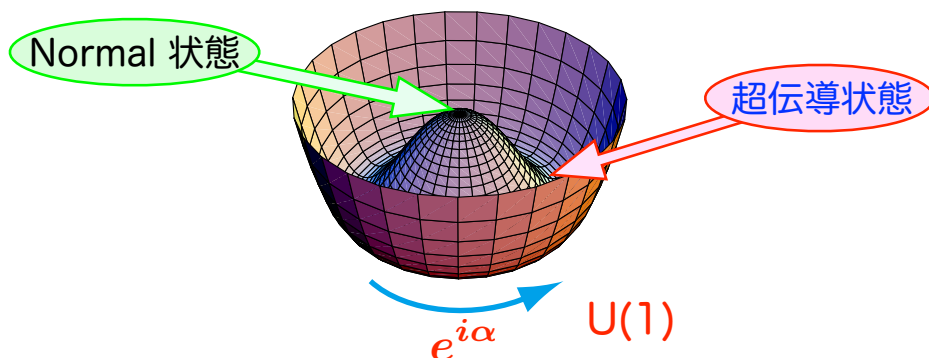
抵抗ゼロで電気が流れる

クーパー対の凝縮

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

Ginzburg-Landau の オーダーパラメータ
電子数非保存

エネルギー $\mathcal{E}(\Psi_{\text{GL}})$



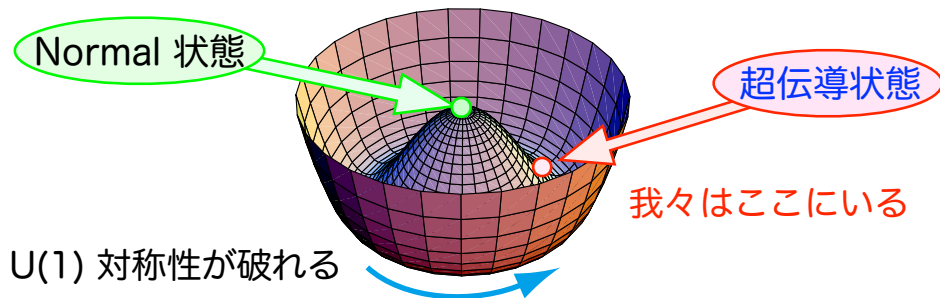
南部の超伝導

ハミルトニアン H
電子数を保存



基底状態
電子数を非保存

ハミルトニアンの対称性 > 基底状態の対称性



対称性の自発的破れ

電子の方程式を書き直してみると

$$\left[\epsilon(\vec{p}) \begin{pmatrix} 1 & \\ & -1 \end{pmatrix} + \Delta(\vec{p}) \begin{pmatrix} & 1 \\ 1 & \end{pmatrix} \right] \begin{bmatrix} c_e(\vec{p}, \uparrow) \\ c_e^\dagger(-\vec{p}, \downarrow) \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} c_e(\vec{p}, \uparrow) \\ c_e^\dagger(-\vec{p}, \downarrow) \end{bmatrix}$$

ギャップ

これは、Dirac方程式 ？

$$\left[\vec{p} \vec{\sigma} \begin{pmatrix} I_2 & \\ & -I_2 \end{pmatrix} + \underset{\text{質量}}{m} \begin{pmatrix} & I_2 \\ I_2 & \end{pmatrix} \right] \psi = E \psi$$

$$\psi = \begin{pmatrix} \xi_{\text{右巻き}} \\ \chi_{\text{左巻き}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi_R \\ \psi_L \end{pmatrix} \quad 4 \text{ 成分}$$

質量はギャップだ

アナロジーから真理へ

質量：左巻き $\rightleftharpoons$ 右巻き

カイラル対称性：左右独立

$$\psi_R \rightarrow e^{i\alpha} \psi_R, \quad \psi_L \rightarrow e^{-i\alpha} \psi_L$$



補足：陽子やクォークの質量

$$m = m_{\text{Chiral SB}} + m_0$$

カイラル対称性の
自発的破れ

もともとある



南部

98~99 %



Higgsボゾン

1~2 %

$m_0 = 0$ なら、パイ中間子 $m_\pi = 0$

$m_0 \neq 0$

$m_\pi = 140 \text{ MeV}$

ほぼ零質量



ヒッグスボソンの発見 (2012)

標準理論の最後の粒子の発見

であるだけでなく

力の統一の描像、シナリオの確立

ヒッグスボソンの正体は、まだ明らかでない

超対称性？

余剰次元？

超弦？

統一理論：アインシュタインと南部の融合

高い対称性

単純
美しい

アインシュタイン



多様な世界

素粒子
力

南部

自発的破れ

真空は空っぽでない
相対論的な媒質だ