

普遍性と創発性から生まれるもの

グローバルCOE

普遍性と創発性が紡ぐ次世代物理学
オープニングシムポジウム

2009年2月16日

川合光

“多様性”から“創発性”へ

- 21COE

キーワード 普遍性と多様性

普遍性 ← 各分野の共通点

多様性 ← 分野ごとの独自性

⇒ 物理の色々な分野間の相互理解

- GCOE

さらなる発展をめざすためのキーワード

多様性に対するさめた意識から積極的利用へ

多様性とは何か、その理解から新しい創造を目指す

⇒ “創発”

“More is different.” を超えて

普遍性

2つの意味

1. 自然界のすべての現象は原理的に基本法則によって記述される。

要注意 素粒子分野と物性分野の
相互理解を阻害するおそれ。

2. さまざまな系に共通の法則性が現れる。

普遍性 2.の例

- 多くの自由度があることからくる普遍性
(中心極限定理・大数の法則 + α (物理))
 - 熱力学
 - 相、相転移のユニバーサリティ
 - 連続体近似・粗視化・平均化
 - 微分方程式による記述
 - 流体力学、G L等の有効理論、
 - 素粒子の場自身、一般相対論も一種の有効理論
 - 散逸、摩擦の普遍性
 - 一様な多体系の量子論
 - 真空と素粒子 \leftrightarrow 基底状態と準粒子・素励起
- 必ずしも多くの自由度と関係しない普遍性
 - カオスのオンセット
 - 非線形現象の普遍性

創発性

基本法則がわかっているにもかかわらず、それから容易に演繹・予想できない現象が自然界でおきている。（一旦認識されれば、説明はできる。）

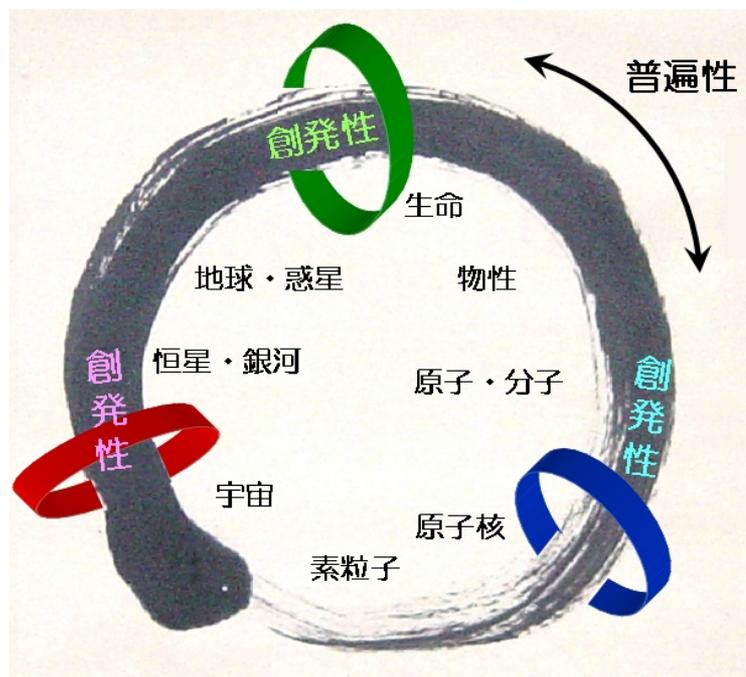
各階層において実験・観測によりはじめて認識された現象
素粒子・原子核、原子・分子、生命、凝縮物質、星・銀河、宇宙

- 物性分野で顕著 基本法則はSchrödinger 方程式
超伝導、高温超伝導、量子ホール効果、いろいろな新物質、
生命(タンパク質、DNA、+・・・)
- 素粒子分野ではあまり意識されてこなかった
(構造の理解と基本法則の解明が平行して発展してきた。)
くりこみ、対称性の自発的破れ、クォークの閉じ込め、

創発性 ⇔ 計算量の不可逆性？（例 約数の発見と判定）

普遍性と創発性の協調 1

当GCOEで目指すもの



物理学は普遍性と創発性の
協調により発展してきたと
理解できる。

これをさらに発展させよう。

創発の発見

⇒他の系での創発を予想

⇒ 普遍的概念

基本法則の深化



普遍性と創発性の協調 2

もう少し気軽に

できるだけ広い視野をもち、

一つの分野で発見されたこと、開発された

実験的・理論的手法を他の分野に移植・

応用することを積極的に考えよう。

普遍性と創発性の協調の具体例 1

- 自発的対称性の破れ -

磁性、超伝導の創発

普遍性 自発的対称性の破れ

系が本来もっている対称性が系の状態によって自然にこわされている。

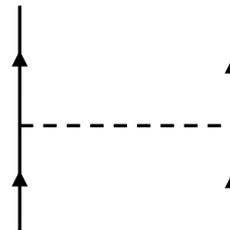
⇒ 真空自身 ハドロン、標準模型

超伝導 1

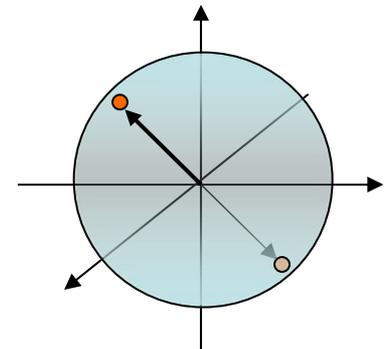
自由電子ガス

$$E = \frac{\vec{p}^2}{2m}$$

フォノンによる引力



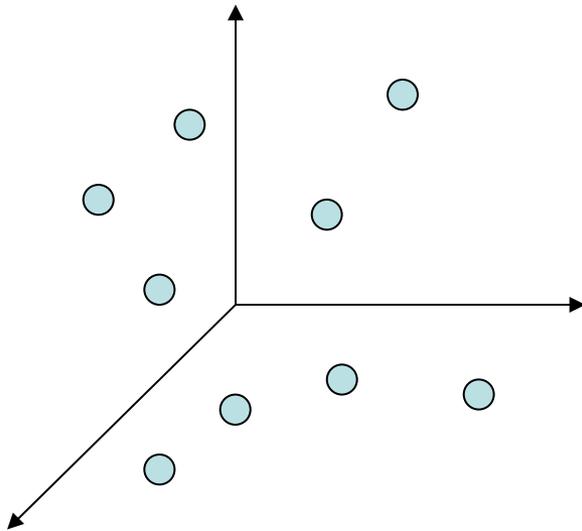
運動量空間



$p \uparrow$ の電子 束縛されて Cooper 対が
 $-p \downarrow$ の電子 \Rightarrow エネルギーが下がる。 \Rightarrow ボース凝縮
(フェルミ面近傍) Cooper 対 (ボソン) 超伝導

超伝導 2

ボース凝縮



高密度のボソンからなる系

複素場 $\phi(\vec{x})$ で書ける。

$|\phi(\vec{x})|^2$: 粒子数密度

超流動 液体ヘリウム

超伝導 Cooper 対のボース凝縮

真空の chiral condensation

カイラル対称性の自発的破れ 1

場の量子論による自然の記述

自然はいろいろな場が互いに相互作用している系

その系の基底状態 = 真空

基底状態のまわりの励起 = 粒子

スピン1/2の粒子(レプトンとクォーク)の場=スピノル場

2種類ある 左手スピノル ψ_L 右手スピノル ψ_R

ローレンツ変換に対する変換性が少し違う。

$$\psi_L \mapsto \exp\left(\frac{i}{2}\vec{\theta}\cdot\vec{\sigma} + \frac{1}{2}\vec{\chi}\cdot\vec{\sigma}\right)\psi_L$$

$$\psi_R \mapsto \exp\left(\frac{i}{2}\vec{\theta}\cdot\vec{\sigma} - \frac{1}{2}\vec{\chi}\cdot\vec{\sigma}\right)\psi_R$$

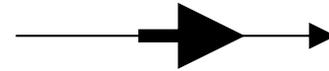
カイラル対称性の自発的破れ 2

ψ_L のみの場合
の励起

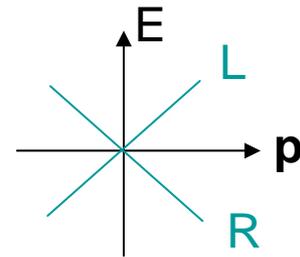
左巻きの粒子



右巻きの反粒子

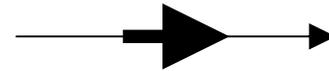


質量 0



ψ_R のみの場合
の励起

右巻きの粒子

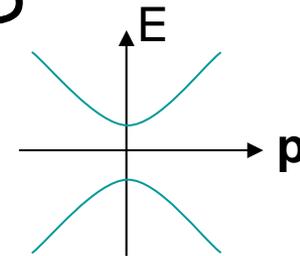
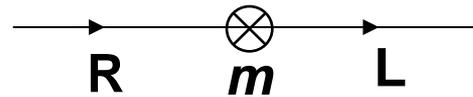
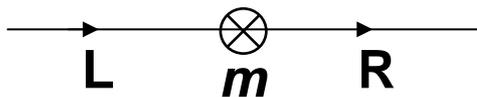


左巻きの反粒子



$$E = \sqrt{p^2 + m^2}$$

ψ_L, ψ_R が共存して混ざり合うと粒子が質量をもつ



レプトンとクォークはこのようにして質量を持っている

カイラル対称性の自発的破れ 3

クォークはこれに加えて強い相互作用からもっと大きな質量を獲得する。

強い相互作用がなかったときの質量

current quark mass $u \sim \text{数 MeV}, d \sim 10 \text{ MeV}$

強い相互作用の効果を受けたあとの質量

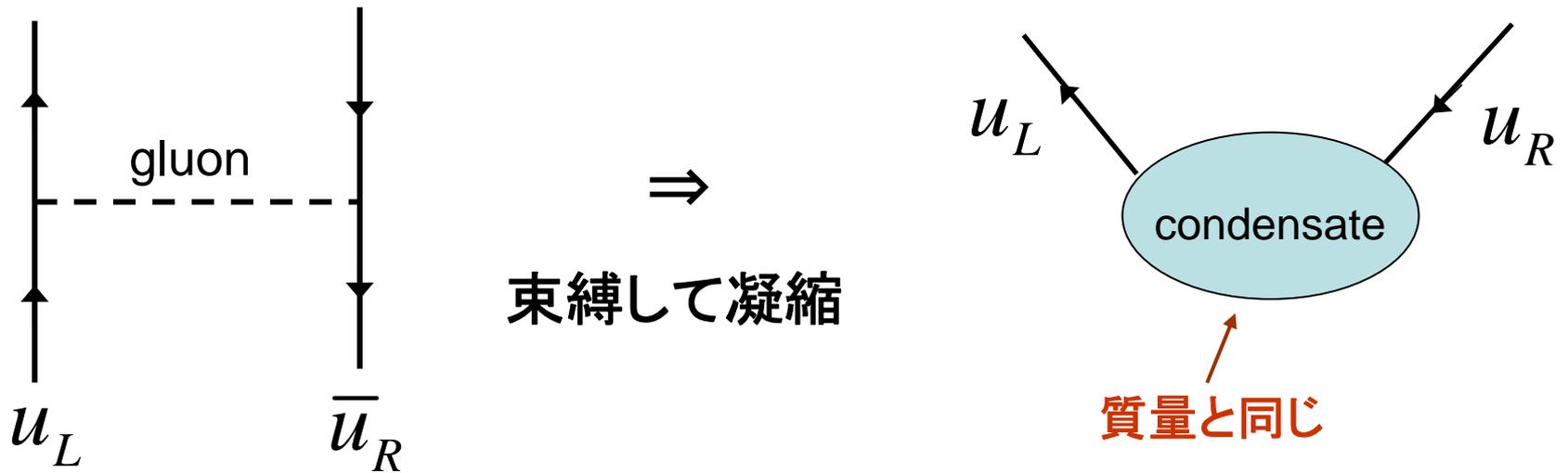
constituent quark mass $u, d \sim 300 \text{ MeV}$

current quark mass が仮に 0 でも、

constituent quark mass $\sim 300 \text{ MeV}$

カイラル対称性の自発的破れ 4

強い相互作用によるクォーク質量の生成



$$\begin{array}{lcl}
 u_L \mapsto \exp(i\theta_L)u_L, & & u_L \mapsto \exp(i\theta)u_L, \\
 u_R \mapsto \exp(i\theta_R)u_R & \xRightarrow{\text{SSB}} & u_R \mapsto \exp(i\theta)u_R
 \end{array}$$

カイラル対称性が自発的に破れることにより、クォークは質量を得る。¹⁵

普遍性と創発性の協調の具体例 2

-くりこみとユニバーサリティ-

くりこみ

素粒子・場の量子力学における創発

普遍性 長距離相関のユニバーサリティ

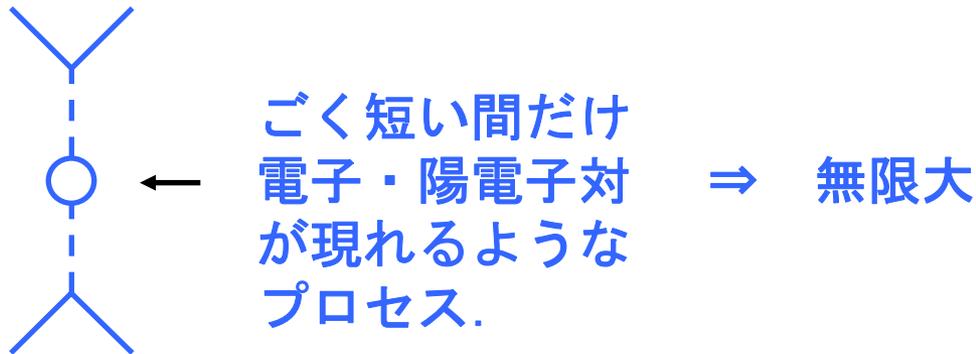
相関距離がミクロスケールより長いとき、
相関はミクロな構造の細部によらない

⇒ 素粒子、凝縮系に共通に成り立つ

ゲージ場の性質 ← 相(秩序・無秩序)

紫外発散とくりこみ 1

中間状態の和を素朴にとると確率振幅が無限大になってしまう。



しかしこれは光子の伝播

に対する補正であり、補正後のものが有限となるように、もとの理論を調節できる。

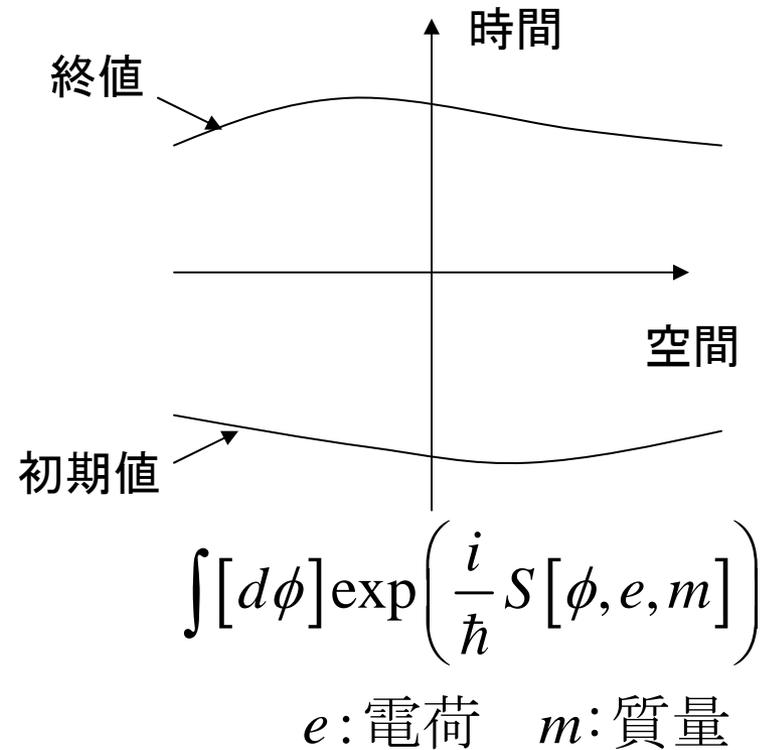
物理的な確率振幅が有限になるように、
素過程のパラメーターを調節することをくりこみという。



紫外発散とくりこみ 2

場の量子論

素朴な量子化 \Rightarrow 紫外発散



くりこみ

$$\lim_{a \rightarrow 0} \int [d\phi] \exp\left(\frac{i}{\hbar} S[\phi, e(a), m(a)]\right)$$

a : カットオフ

くりこみとユニバーサリティ

ユニバーサリティ

くりこみの結果得られる理論は少数のパラメーターしか含まない（場の中心極限定理） **くりこみ群**

⇒ カットオフスケールより長距離ではくりこみ可能な場の理論で記述される

ミクロな距離に比べて相関距離が長いとき
凝縮系は少数のパラメーターで普遍的に記述できる。

素粒子論における創発 → 物性における創発

ゲージ場の性質 ← 相（秩序・無秩序）

まとめ

普遍性と創発性のかかわりあいを意識することにより、新しいものをうみ出していけるのではないか。

各分野の知見を広く共有し、
一つの分野で発見されたこと、開発された
実験的・理論的手法を他の分野に移植・
応用することを積極的に考えたい。

各研究者の立場からは

自分の分野から他分野へ

他分野から自分の分野へ