

弦理論、幻理論、原理論

共同弦想論序説

東京大学駒場

風間洋一

「1960年代に提唱された標準模型の最も重要な鍵である電弱対称性の自発的破れに人類の手が届こうとしている今、広い視野から弦理論の過去と未来を展望する」

という趣旨のレビューをお願いしたい

(風: これは何かの陰謀のようだが・・・)

風: 私ごときで、とも思うが、せっかくのご指名なので、私見がかなり入るがよろしいか?

尾: 私見たっぷりでよろしい

吉本隆明 3/16/2012死去

戦後思想界の巨人であり詩人
(東工大電気化学科卒)

『言語にとって美とはなにか』(1965)

『共同幻想論』(1968)

国家、宗教、法、習俗、文化すべてを、
共同幻想という新しい概念を導入して
包括的に論ずる

三つの幻想の概念

自己幻想、対幻想、共同幻想

国家とは共同の幻想 ←マルクス

本質的課題: 共同幻想の解体、

自己幻想の共同幻想からの自立



弦理論は物理学史上 最も壮大な共同幻想に なりつつあるか？

弦理論のスケールが直接実験にかからない、という問題ではない

方向性としての、意識としての

「現象からの乖離」

とその「容認」の問題

「・・・としている今」、
現象論の研究者と共に弦理論を想い論ずる端緒を
開くことは非常に有意義ではないか

幻想化の系譜

1. ”現象論”と”理論”の分化

1970年代、”現象論”と”理論”という分類はほとんど無かった。
物理理論は、すべて現象を説明すべきものとして、捉えられていた。

物理は4次元で起こる!

いつ頃から現象論と理論の分化が起こり始めたか?

‘t HooftからWittenへ

‘t Hooft (1946~): 論文を書かないことが脅威であった時代

1970~1980: 20, 13, 2, 1195

1980~1990: 29, 3, 4, 168

Witten (1951~): 論文を書き続けることが脅威であった時代

1975~1985: 72, 27, 17, 530

1985~1995: 103, 29, 16, 408

パラダイムシフト: 1981 ~ 1982

Dynamical breaking of supersymmetry, NPB188 (1981) (cited 2000+)

Constraints on supersymmetry breaking, NPB202(1982) (cited 1000+)

Witten index の導入

$$\text{Tr} (-1)^F$$

Almost everything cancels !

2. Supersymmetry

この30年間で最もdrasticな影響を与えたもの

Field Theory Interpretation of Supergauges in Dual Models

Gervais-Sakita (1971)

Is the Neutrino a Goldstone Particle? : Volkov-Akulov (1973)

Supergauge Transformations in Four-Dimensions :

Wess-Zumino(1974)

当初はそれほど注目されなかった



Supergravity

Gauge hierarchy problem & Supersymmetry

Eldad Gildener: “Gauge symmetry hierarchies” (1976)

- Gauge hierarchy problemをsupersymmetryで解決(緩和)しようという試みの始まり

Martin Veltman: “The Infrared-Ultraviolet Connection”

Act.Phys.Pol. B12(1981)437

繰り込み不可能理論のcut-off依存性 → Screening theorem

HiggsなしのStandard modelでもeffective Λ は10TeV

Naturalnessの概念 (cf 't Hooft (79))

Softly broken SUSY起源の質量公式の提案



- この思想を具現化するモデル: **SUSY GUT**

Dimopoulos-Georgi: “Softly Broken Supersymmetry and SU(5)” (1981)

Sakai: “Naturalness in Supersymmetric GUTS” (1981)

SUSYの特異性

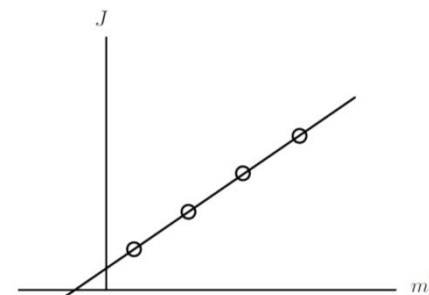
- 低エネルギーにおいて完全に破るために導入した対称性。その痕跡は全く見えない。
- 容易にダイナミカルに破れない。エネルギーが下がれば良いというわけにはいかない
- 自由度やダイナミックスのcancellationを促す
→ 量子効果の抑制、古典化、**toy model**化

こうした特異な性質をもつSUSYを、不可欠な要素として、**超弦理論が再登場**

3. 超弦理論の変遷

弦理論は現象論として出発した

Dual Resonance Model (双対共鳴模型)
無限個の幅の狭い共鳴状態を一括して扱う試み

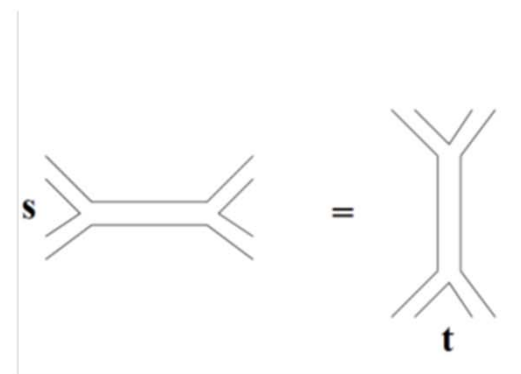


DRMの基本仮定

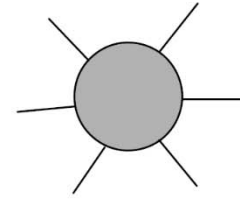
- すべての共鳴状態は幅を持たずlinear trajectories上に乗る
- 散乱振幅の**解析性**、**crossing symmetry**, **unitary性**

1968 Veneziano振幅の発見

$$\begin{aligned} A_4 &= \frac{\Gamma(-\alpha(s))\Gamma(-\alpha(t))}{\Gamma(-\alpha(s) - \alpha(t))} = \int_0^1 dx x^{-\alpha(s)-1} (1-x)^{-\alpha(t)-1} \\ &= -\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \prod_{l=1}^n (\alpha(s) + l) \frac{1}{\alpha(t) - n} \quad t\text{-channel poles only} \\ &= -\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \prod_{l=1}^n (\alpha(t) + l) \frac{1}{\alpha(s) - n} \quad s\text{-channel poles only} \end{aligned}$$



N点振幅への拡張 Koba-Nielsen:



$$A_N = \int dz_1 \cdots [dz_a][dz_b][dz_c] \cdots dz_N |(z_a - z_b)(z_b - z_c)(z_c - z_a)| \\ \cdot \prod_i |z_{i+1} - z_i|^{-1} \prod_{i>j} |z_i - z_j|^{-2p_i \cdot p_j} \prod_i |z_{i+1} - z_i| e^{-m^2}$$

$$[a, a^\dagger] = 1, \quad e^A e^B = e^B e^A e^{[A,B]}$$

(Nambu's talk (1970))

$$e^{cb_i b_j} = \langle 0 | e^{\sqrt{c} b_i a} e^{\sqrt{c} b_j a^\dagger} | 0 \rangle$$

実際は 無限個の HO が必要: $a_m^\mu, a_n^{\mu\dagger}$

南部、Nielsen, Susskindのアイデア

DRMのharmonic oscillatorsは弦の振動モードと同定できる

弦理論の没落

弦理論は1973年頃から急速に没落

理由

- 臨界次元が現実とかけ離れている。26次元、10次元。
- 臨界次元ではmassless粒子が存在してしまう。ハドロンの理論としては不適當。
- タキオンの存在。理論は不安定。
- QCDの台頭とasymptotic freedomの発見

弦理論の復活と興隆

Green and Schwarz (1984-85)

- 超弦理論のconsistency: Quantum anomalyの相殺
10D N=1 SYM + SG : $SO(32)$ および $E_8 \times E_8$ ゲージ群
- 超弦理論の有限性の示唆: Type I $SO(32)$ 1-loop ですべての無限大が完全に相殺。

弦理論が立脚する、それ以前とは質的に異なる、基本的前提 (～ 非現実性)

SUSY : 非常に広い意味での量子効果の抑制。

- 発散の相殺
- 物理的な効果の抑制→スケルトン化

非4次元(高次元、2次元)

- 4次元特有のダイナミックスをどう回復するか

4次元：ゲージ理論が繰り込み可能である最大の次元
重力が伝播できる最小の次元

その後の発展

- 84 2次元共形場理論
- 84 T-duality
- 86 超共形場理論と超弦理論
- 84 ~ 86 超弦理論の5つのタイプ:
Type I, IIA, IIB, Het $E_8 \times E_8$, Het SO(32)
- 86 ローレンツ共変な弦の場の理論
- 87 ~ コンパクト化 (Torus, Calabi-Yau): 現実的統一理論の模索
- 87 超膜理論の構成
- 88 トポロジカルな場の理論
- 88 ~ 92 2次元の量子重力、行列模型

- 94 **Seiberg-Witten** 理論
- 94 ~ 弦理論の双対性
- 95 **M**理論
- 95 **D-brane**: D-braneの多体系とSuper Yang-Mills理論
- 96 **ブラックホールエントロピー**の微視的理解
- 97 M理論と弦理論の**行列模型** (BFSS, IKKT)
- 97 ~ **AdS/CFT** とホログラフィー
-

AdS/CFT以後

意識の上で、弦理論とゲージ理論の区別がなくなってきた。

基本的なアイデアに大きな変化はない

技術的に高度に発展(可解性、localization、etc)

様々なトピックスが絡まり合って発展しているが、おおむね二つの大きな潮流あり

ゲージ/重力対応

重力との関わりを追求

- 対応の詳細とメカニズムの研究
- 対応を仮定し、様々な強結合の物理の解明に適用

超対称ゲージ理論の数理

重力はdecouple

N=2超対称ゲージ理論に対するSeiberg-Witten理論の拡張
ブレーンの配位によるゲージ理論の実現の描像をヒントにする

高い超対称性がcrucial  物理理論としては toy model化

- 実際の物理現象の本質的メカニズムを理解するのに役立つモデルになっているか。
- それを第0近似として、有効な摂動論が展開できるか。
- 高いSUSYを持った理論の場合、SUSYの破れをきちんと記述できるか。

最近の発展の動向

S-dualityの拡張による新しい超共形ゲージ理論の構成および
M理論との関係の拡張

高次元(4,5,6次元)の超対称ゲージ理論とそれを
dimensional reductionした低次元の理論との厳密な数学的關係

(弦) ”理論” 自体の分化

物理



数学

強結合の物理を解くための
手段としての弦理論

数学としての弦理論
と超対称ゲージ理論

量子重力を含む
自然の基礎理論としての
弦理論

弦理論は原理論か

弦理論は自らの論理の中で、自然を記述する物理理論としての存在理由を提示しなければならない

弦理論ありき、ではない論理

Key

重力の量子論

弦理論は量子重力を必然的に含む

重要な問： 逆は真か。

弦理論は必然か

場の理論は明らかに必然： IR effective theory (繰り込み群、universality)

これとは逆の方向の問

ゲージ理論は必然か、という問と同種

Standardモデルからの教訓

Martin Veltman: “ The Infrared-Ultraviolet Connection” (1981)

Spin 1 粒子理論 :

最も悪い発散がキャンセルすることを保証する
対称性を要求 → Local gauge symmetry

- “ Uniqueness of Spontaneously Broken Gauge Theories”,
J. Cornwall, D. Levin and G. Tiktopoulos, PRL 30(73) 1268
- “ High Energy Behavior and Gauge Symmetry ”,
C. Llewellyn Smith, PL46B (73) 233

Unitarityの議論の重要性

't Hooftの回想:

(presented in the international conference on:
“The History of Original Ideas and Basic Discoveries in
Particle Physics”, Erice, 1994)

More important to my mind was that we now had a large class of renormalizable models with massive and massless vector mesons. A crucial argument was added to this by Chris Llewellyn Smith and J. Cornwall, D. Levin and George Tiktopoulos: they showed that requiring **unitarity** implies that the **only such models are gauge theories**. So not only do we have a large class of new models, we have the complete class of renormalizable vector theories.

UVでの良い振る舞いの要請

正しい理論を構築する強力で
自然な武器になり得る

重力の "UV completion" の問題

Massless spin 2粒子を含む理論のUVの振る舞いの改善およびunitarityを追求すると何らかの「弦理論」に到達するか。

重要な問

「弦理論」であることをどう特徴付けるか

(Weak couplingの場合が基本)

- スピンが2またはそれ以上の粒子を無限個含む
- 振幅の **crossing symmetry** 無限個のポールの必要性
CFTの特徴 (但し弦理論はS行列を扱う)
- 対称性からの特徴付け? Non-compact 群の無限次元ユニタリー表現?
非線形表現  線形表現

Spin 1 Local gauge symmetry

Spin 2 What symmetry ?

Higher spin gauge theoryからのヒントの可能性

Duality between 3D CFT and 4D theory in AdS spacetime with higher spin gauge fields

A theorem of Maldacena and Zhiboedov, arXiv:1112.1016

Existence of **a** conserved current with spin > 2 in 3d CFT



infinite number of higher spin conserved currents



correlation functions of these currents are those of free theory

Conformal invarianceが少し破れた場合でも議論ができる

A conjecture of Maldacena-Zhiboedov (arXiv:1204.3882, Appendix G)

“A Lorentz invariant theory in three or more dimensions, which is **weakly coupled**, contains **a massive particle with spin $s > 2$** , and has amplitudes with **suitably bounded behavior at high energies**, should be **a string theory**. ”

さらに、次のconjectureと組み合わせれば、弦理論の必要性が言える：

“UV completion” of Einstein gravity requires a massive particle with spin $s > 2$

LHCおよびポストLHC時代の素粒子論

待望の新しい実験結果が開示されつつあるエキサイティングな時期。
確実に自然の構造をもう一段高いレベルで理解できる。

しかし、また我々はcrucialな時代にさしかかっている。

ポストLHC時代の素粒子論

“現象論”も、実験結果という最も強力で示唆的なヒントを
得がたい時代に入っていくであろう。

ますます、理論的に**緻密で卓抜な**考察が必要となる

現代の(素粒子)物理に最も重要な影響を与えてきた基本概念

- Spontaneous symmetry breaking
- Renormalization group
- Non-abelian gauge theory

おそらく、これらに匹敵するような新しい概念の発明が必要

我々の共通の基本的な問

原理論とは何か？

La Fin