

場の量子論再考

山崎 雅人



平成二十七年如月二十一日 於 理研

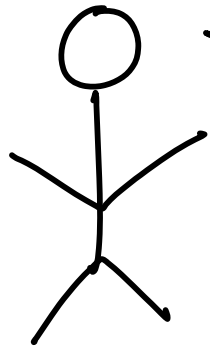
橋本研 closing

橋本研 ~~closing~~



commencement



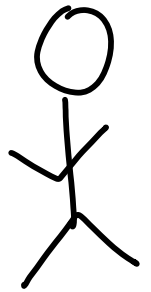


場の量子論(の一側面)
について考え直したい!!

そんな必要がある?

場の量子論は

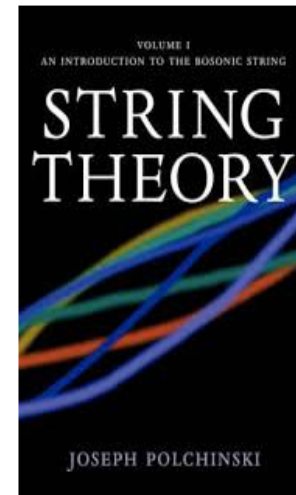
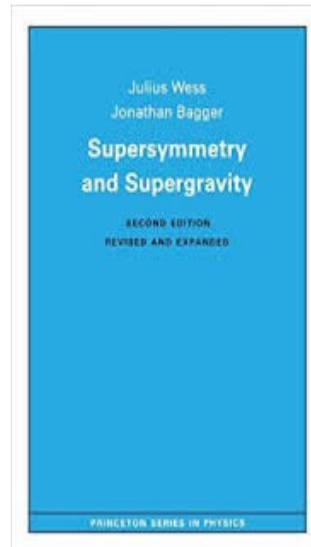
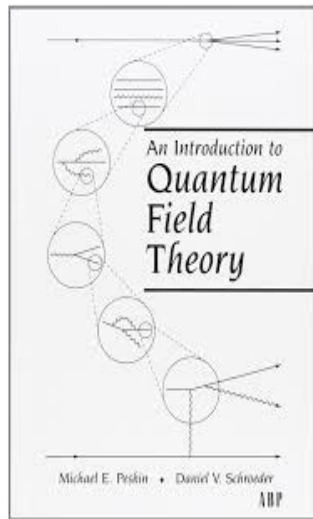
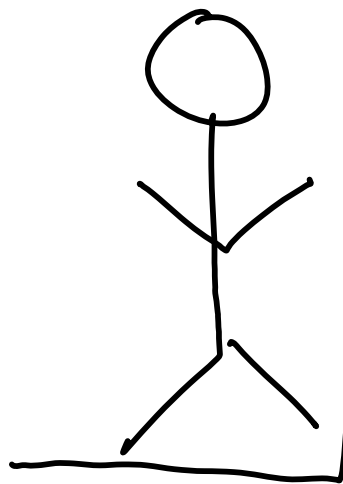
長い歴史のもとに確立済のパラダイム



通過点???

Cool
stuff

B4/M1



實際、長い歴史

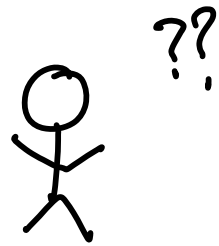
Zur Quantendynamik der Wellenfelder.

Von **W. Heisenberg** in Leipzig und **W. Pauli** in Zürich.

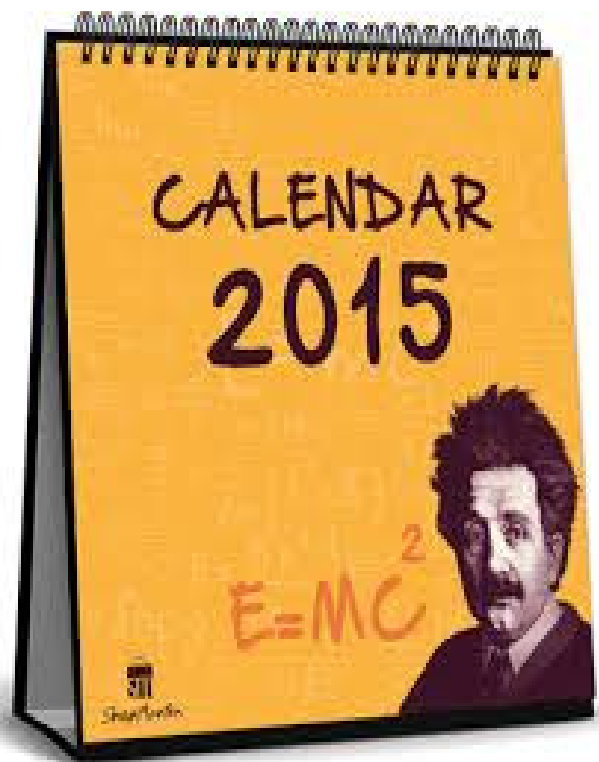
(Eingegangen am 19. März 1929.)

Einleitung. — I. Allgemeine Methode. § 1. Lagrangesche und Hamiltonsche Form von Feldgleichungen, Energie und Impulsintegrale. § 2. Kanonische Vertauschungsrelationen (V.-R.) für stetige Raum-Zeit-Funktionen. Energie und Impulsatz in der Quantendynamik. § 3. Relativistische Invarianz der V.-R. bei invarianter Lagrangefunktion. — II. Aufstellung der Grundgleichungen der Theorie für elektromagnetische Felder und Materiewellen. § 4. Schwierigkeiten der Quantelung der Maxwell'schen Gleichungen, Notwendigkeit von Zusatzgliedern. § 5. Über das Verhältnis der hier aufgestellten Gleichungen zu früheren Ansätzen für die Quantenelektrodynamik ladungsfreier Felder. § 6. Differential- und Integralform der Erhaltungssätze von Energie und Impuls für das gesamte Wellenfeld. — III. Annäherungsmethoden zur Integration der Gleichungen und physikalische Anwendungen. § 7. Aufstellung der Differenzgleichungen für die Wahrscheinlichkeitsamplituden. § 8. Berechnung der Eigenwertstörung bis zur zweiten Ordnung in den Wechselwirkungsgliedern. § 9. Über die gemäß der Theorie beim Durchgang von Elektronen durch Potentialsschwellen zu erwartende Lichtemission.

大成功!!



巨大な体系 (人類の叡知)



2015

一般相對論

100年

特殊相對論

110年

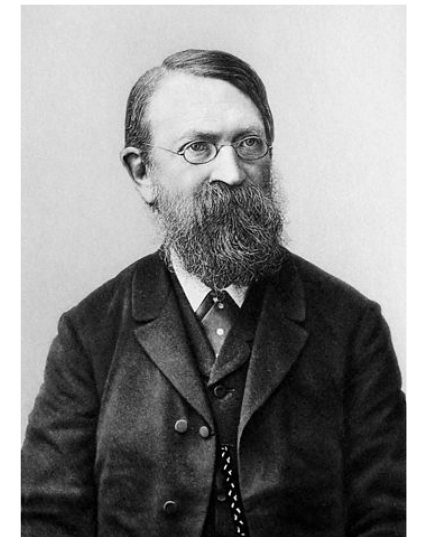
彼（マッハ）の大きな貢献は、18・19世紀に支配的だった物理学の基礎についてのドグマチズムを解きゆるめたことだ。とくに力学と熱学において... もっとも基礎的な概念さえその正当化は経験から得るのであって、けっして論理的に必然的なものではない、という立場を納得のゆくよう主張した。（1948年1月6日ベッソー宛の手紙、アインシュタイン）

Ernst Mach

マッハ「力学史」：反形而上学

第4章第2節：「力学における神学的、アニミズム的、神秘主義的観念について」

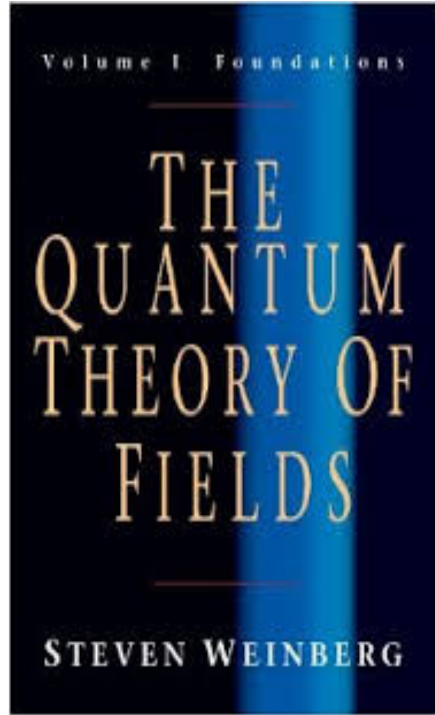
恒常不変な実体、「原因と結果」「目的」の概念、「絶対空間」「絶対時間」への懐疑



場の量子論は

何故現在の形か？

そのエッセンスは？



"folk theorem" by S. Weinberg

...I aim to present quantum field theory in a manner that will give the reader the clearest possible idea of WHY this theory takes the form it does, and why in this form it does such a good job of describing the real world.

量子力学 + Poincaré sym

既約表現としての場

+ cluster decomposition

↳ creation/annihilation operator

(多くの投げ道 [cf. Weinberg hep-th/9702027])

原理？

— 量子力学

— Poincaré 对称性

— locality \sim cluster decomposition

— unitarity

⋮

原理？

— 量子力学

— Poincaré 対称性

— locality

— unitarity

⋮

例

Spin 1

gauge sym.

時に両立が難しい
(明白な形での)

原理？

— 量子力学

— Poincaré 対称性

① 対称性

— locality

— unitarity

低エネルギー有効理論

くりこみ

② 双対性

理論空間



2015

1. 对称性

対称性 → 物理

ウィルソン流

次元、対称性、... → 低エネルギー
有効理論

(※パラメータの値は
決定しないといけぬ
e.g. 標準模型)

[Coleman-Mandula, Haag-Lopusanski-Sohnius]

- SUSY
- conformal sym.

super conformal sym.

[Nahm 分類頁 '78]

e.g. unitarity bound.

\downarrow
a-max, F-max, ...

Superconformal bootstrap

[Coleman-Mandula, Haag-Lopusanski-Sohnius]

- SUSY
- conformal sym.

↳ $D=2$ Virasoro sym. 😊😊

ラグランジアンは必要ない

(例: minimal model
↑ $\frac{SU(2)_k \times SU(2)_l}{SU(2)_{k+l}}$ WZW)

[Coleman-Mandula, Haag-Lopusanski-Sohnius]

- SUSY
- conformal sym.

↳ $D > 2$ $SO(D,2)$ 有限次元

しかし強力な制限を与える

numerical bootstrap ('08 ...)

[Rattazzi Rychkov Tonni Vichi '08 ...]
many papers

(conformal block の recursion
[Penedones Trevisani Y to appear]
(KEK theory workshop)

- higher spin sym.
[Maldacena Zhiboedov '11]

スピⁿ $s > 2$ の対称性 (保存カレント)

を持つ $D=3$ unitary CFT

は free ! }
(later $D=4$)

↓
Stress tensor
OPE
finite # of
primary for
;
;
 $\Delta < \textcircled{11}$

(※ 「近似的」 HS sym. は
free でなくともよい)

- dual (super) conformal symmetry
[Drummond Henn Korchemsky Sokatchev '06]

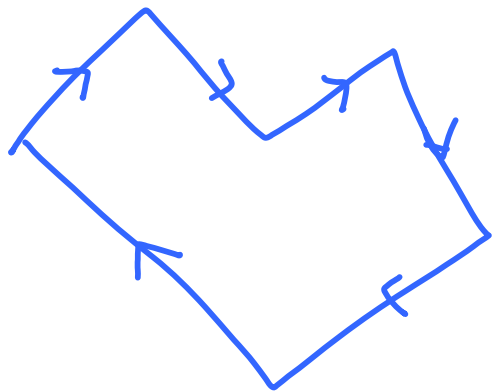
4次元 planar $N=4$ 理論の対称性

\mathcal{L} では存在しない

\rightarrow 3D ABJM as well

AdS 側からの説明

[Alday-Maldacena '07
Berkovits Maldacena '08]



$$P_i^\mu = X_{i+1}^\mu - X_i^\mu$$

momentum

dual coordinate

($\sum P_i^\mu = 0$: momentum 保存)

X_i^μ に作用する

- conformal $J = J^{(0)}$ $[J^a, J^b] = i f^{ab}_c J^c$
- dual conformal $\hat{J} = J^{(1)}$ $[J^a, \hat{J}^b] = i f^{ab}_c \hat{J}^c$
- 無限次元代数: Yangian $Y(\mathfrak{g})$ 😊
- ≡ 可積分性

例: planar 散乱振幅をほぼ決定する

[for non-planar cf. Arkani-Hamed, Bourjaily, Cachazo, Trnka '14]

例 グラスマン公式 [Arkani Hamed Cachazo
Cheung Kaplan '09]

$$A_{n,k} = \int \frac{d^{kn} C}{|GL(k)|} \frac{1}{M_1 \dots M_n} \int_{\text{twistor}} \mathcal{G}^{k|4k}(C, \mathbb{Z})$$

$A_{n,k}$: # particle (n), # of + helicity (k)
 $d^{kn} C$: Grassmannian $Gr(k, n)$
 $|GL(k)|$: $k \times k$ minor
 $M_1 \dots M_n$: twistor

Yangian invariance を直接 check できる

例 グラスマン公式
の変形

[Bargheer Huang Loeblert
Ferns Lukowski Staudacher
(14)]

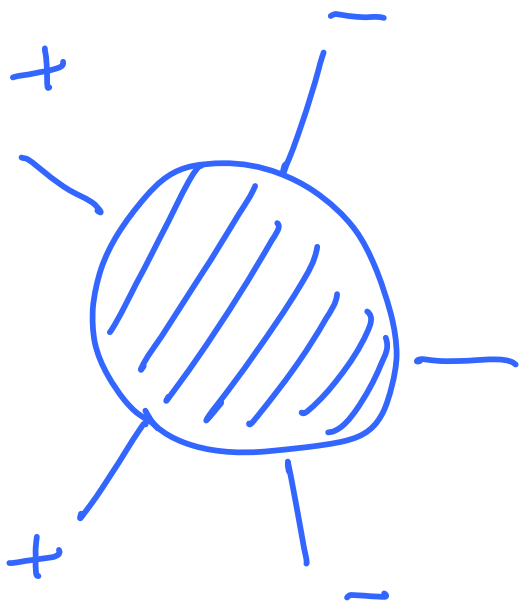
$$A_{n,k}(b) = \int \frac{d^{kn} C}{|GL(k)|} \frac{1}{M_1^{+b_1} \dots M_n^{+b_n}} \int_{\mathbb{C}^{\times k}} (C \cdot Z)$$

($\sum b_i = 0$)

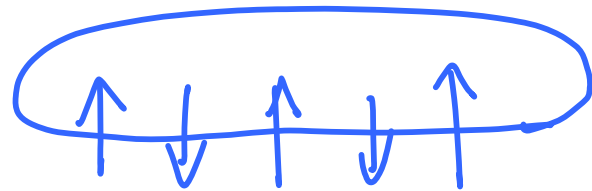
• Yangian の
evaluation repr.

• 可積分系のスペクトル
パラメータ

散乱振幅



スピノ系



- "T-reflection" [Başar-Cherman-McGady-Y'14]

\sim
 φ

temperature β

temperature

independent

多くの系で $Z(-\beta) = e^{i\varphi} Z(\beta)$ phase

例: minimal model の character

$$\chi(q = e^{2\pi i\tau}) \quad \left(\begin{array}{l} q \rightarrow q^{-1} \\ \tau \rightarrow -\tau \end{array} \right)$$

φ

* not $SL(2, \mathbb{Z})$

rather $GL(2, \mathbb{Z})$

真空エネルギー - Λ の応用

(non-SUSY な系で $V_{Casimir} = 0$) [BCMY'14]

2. 双対性

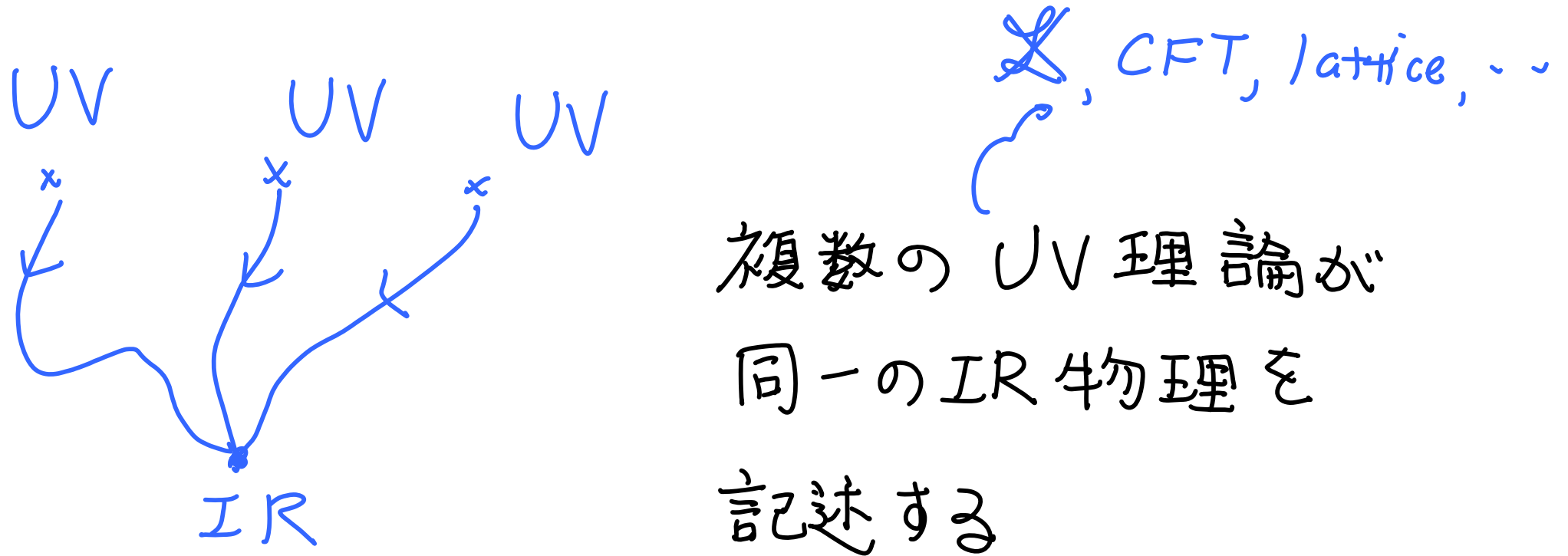
理論空間

Weiberg の本では、 \mathcal{L} による記述を
正当化しようとした。

しかし、この記述は *highly redundant*

- field/parameter redefinition
- *gauge symmetry* (or rather redundancy)
- *duality*

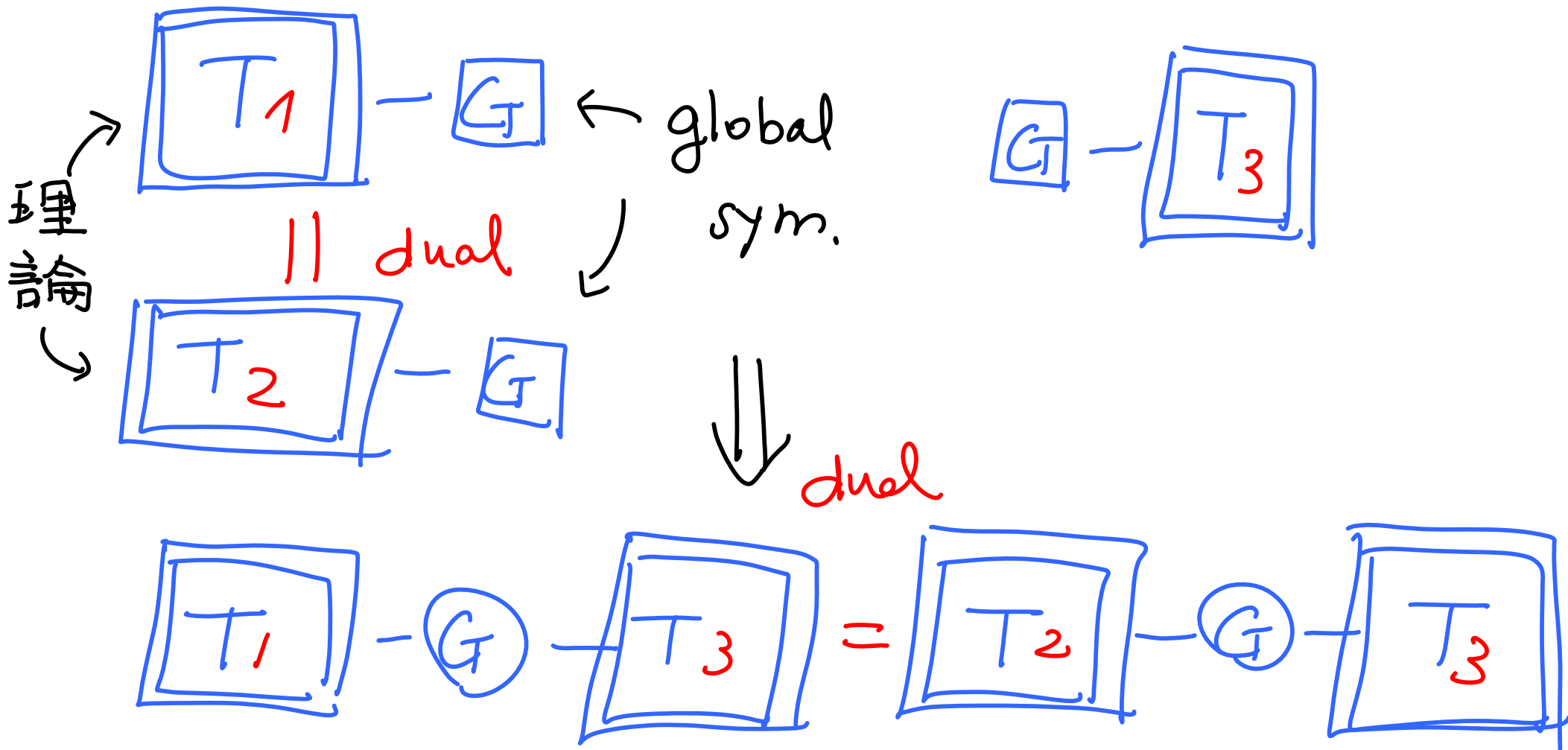
双対性は、くり込み群の意味では
普遍的な現象



[典型例 : Seiberg dual]
4d $N=1$

ゲージ化と双対性から、更に大きな

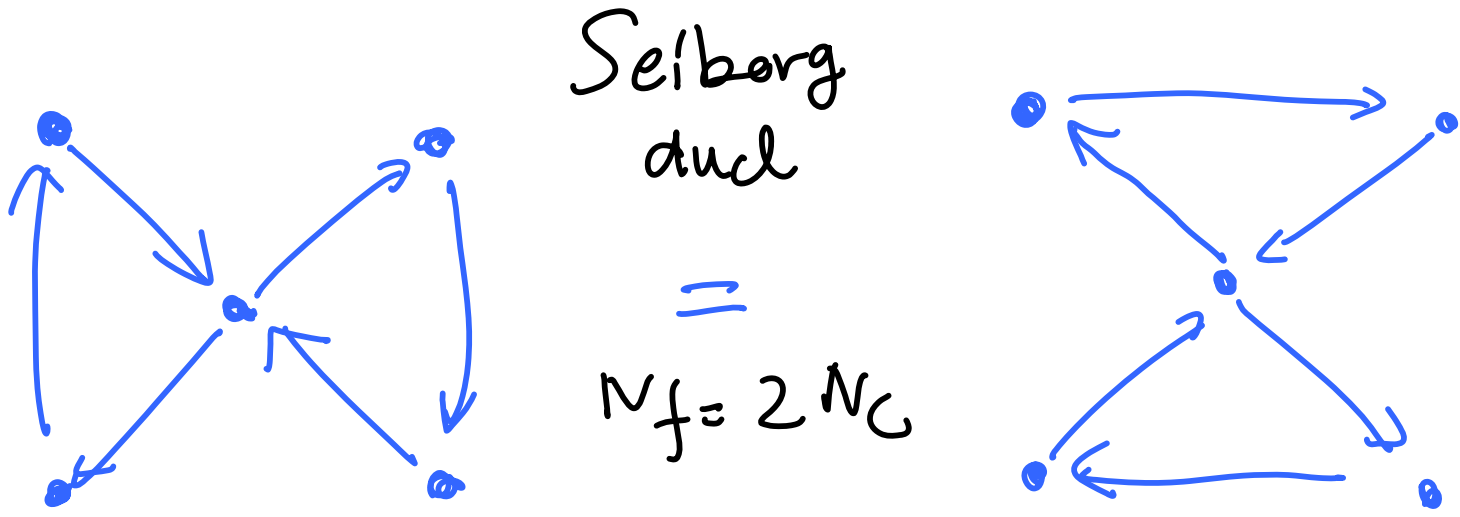
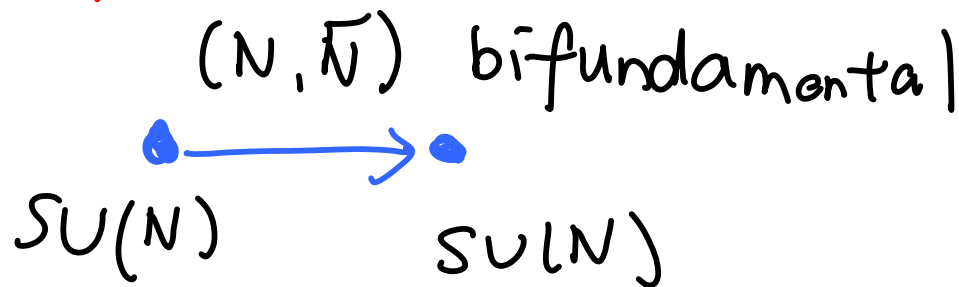
双対性を構成できる



(* \exists caveats)

例]

箭 (quiver) ゲージ理論



巨大な quiver で局所的に操作できる
(理論空間での locality)

実は、同じ図は可積分系でも
"Star-star relation" として

知られており、

Yang-Baxter eqn の解を与える

[Baxter, Bazhanov, ... '80s]



Gauge / YBE

[Y '14; Wen-Y to appear]
(12-13)

ゲージ群



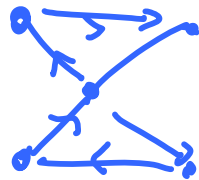
スピオン

bi-fundamental



スピオンの相互作用

理論



R-matrix

R-charge



spectral parameter

YB duality



YB eqn

$S^1 \times S^3 / \mathbb{Z}_r$ index



分配関数

— 一こうして構成された可積分模型は

新しく、最も一般的な可積分模型の一つ

楯田量子群 $U_{p,q}(\mathfrak{g}), U_{p,q; r}(\mathfrak{g})$

— 可積分構造は一つの理論ではなく

理論の集合に存在
異なる quiver で現わされる

“integrability in theory space”

[cf. Nekrasov-Shatashvili]

主張

QFT の theory space には

今迄見落されてきた豊かな

構造がある!!

[cf. CFT の marginal deformation]
Zamolodchikov metric]

???

in theory space

✓ integrability in theory space
['14 Y]

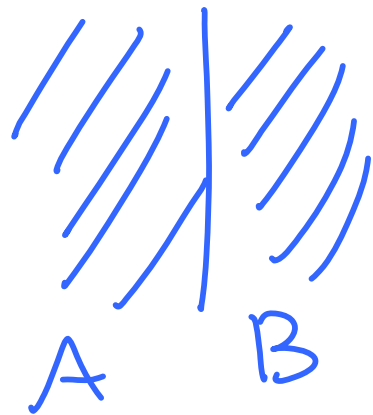
✓ entanglement //
['13 Y]

✓ cluster algebra //
['13 Terashima - Y]

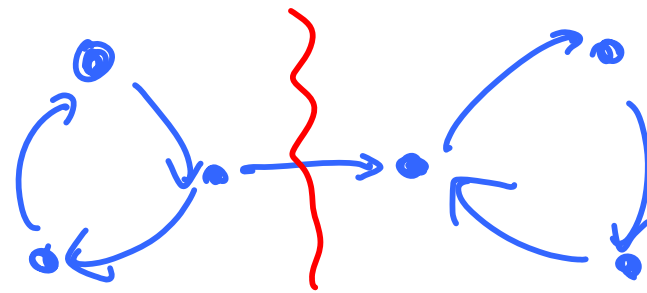
entanglement in theory space [13 Y]

通常のエンタングルメント:

空間の分割



理論空間の分割



quiver で "分割"

$$\rho_A = \text{Tr}_B \rho_{\text{tot}}$$

$$S_A = -\text{Tr}_A \rho_A \log \rho_A$$



[関係あり]
cf. deconstruction]

cluster algebra in theory space

(クラスター)

[Terashima-Y '13]

quiver と その mutation

~~~~~> 3d  $N=2$  理論

クラスター変数

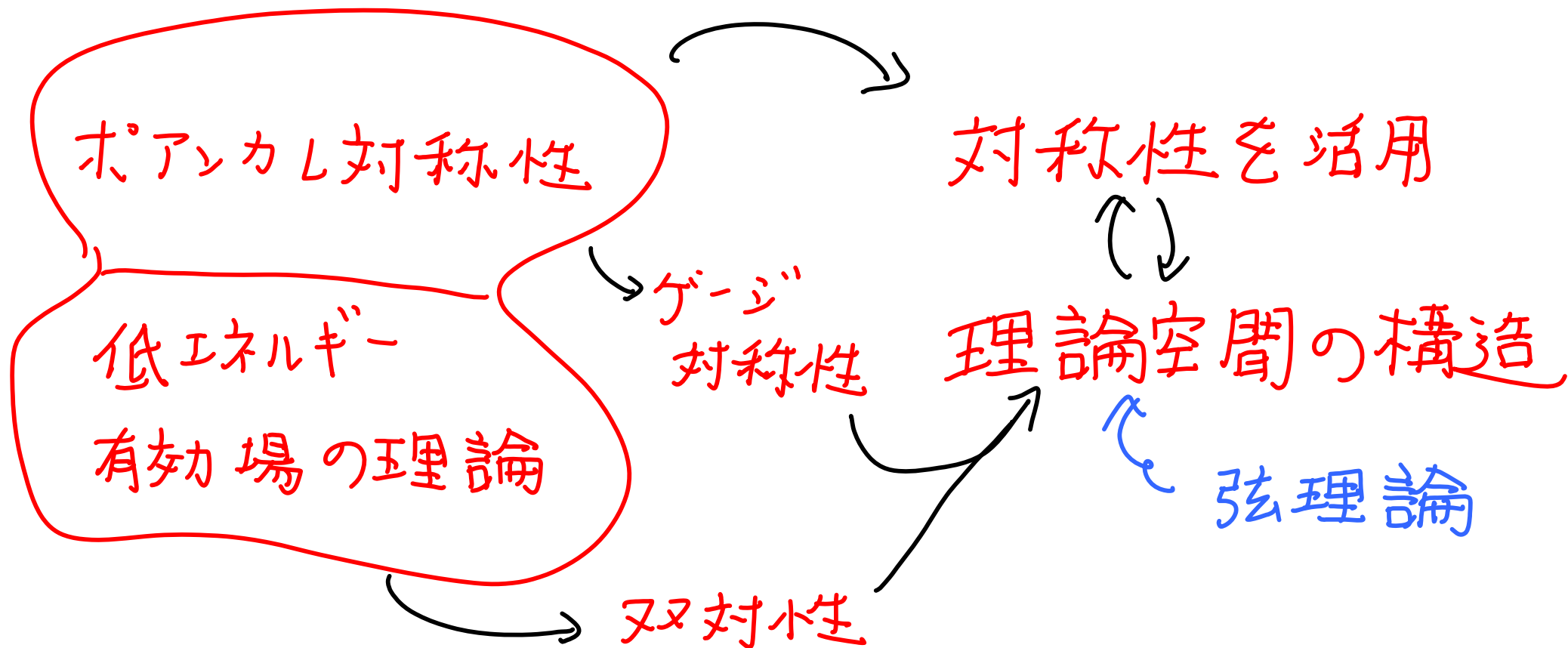
~~~~~> ループ演算子

⋮

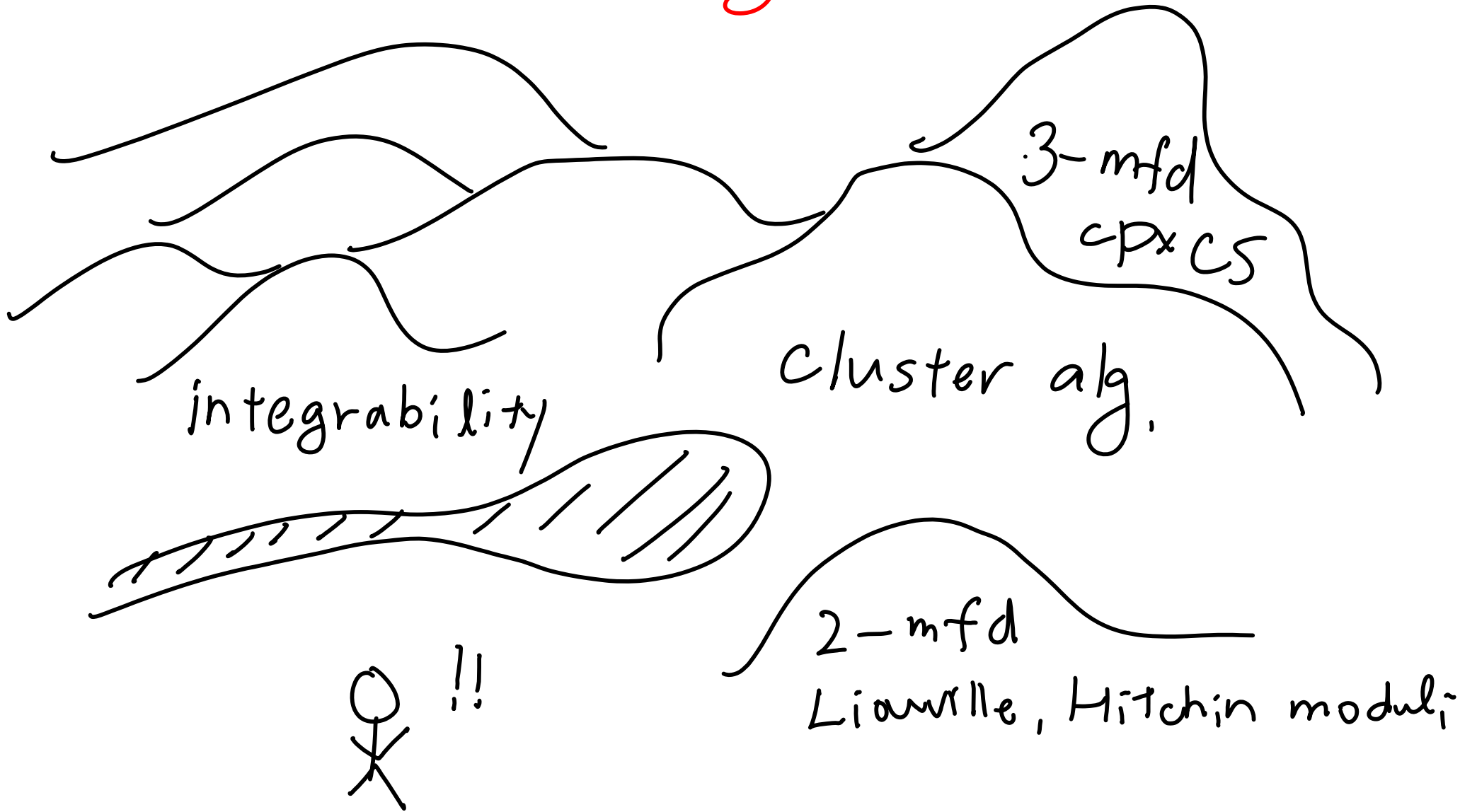
[基本的な考え: 3d $N=2$ Abelian CS theory を
その対称性をもとに指定する]

まとめ

場の理論の基礎を考え直すことには
意味があるのでは？ その(1つの)帰結は



landscape of QFT
= terra incognita



今日の話の一部をより詳細に
説明したもの

- 「場の理論の分解学」 数理科学 2012/10月号
- 場の理論の幾何 (仮題)

2015 日本語で出版予定

2016以降 英語, arXiv?

乞うご期待!

IPMU, 5年延長決定

朝日新聞
DIGITAL

検索

目次

総合ガイド 登録申し込み

ログイン

トップニュース

スポーツ

カルチャー

特集・連載

オピニオン

写真・動画

朝夕刊紙面・be

MY朝デジ

新着

社会

政治

経済・マネー

国際

テック&サイエンス

教育

環境・エネルギー

医療・健康

地域

English

朝デジスペシャル

トピックス ウクライナ情勢 「マッサン」 “テツ”の広場 黒田博樹、カーブ復帰 戦後70年 ネコの記事特集

ツイート 65

シェア 46

g+ 0

Bl 0

ブログに利用

朝日新聞デジタル > 記事

サイエンス

教育・子育て

大学

東大研への補助金支援、延長方針 文科省拠点プログラム

野瀬輝彦 2015年2月13日 19時14分

印刷

メール

世界水準の研究所を作るため始めた「世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)」で文科省は13日、特に優れた業績を残したとして東京大研究拠点への補助金支援を5年間延長する方針をまとめた。東北大、京都大など4拠点は開始10年を迎える2016年度で支援を終える。

支援が延長されるのは東京大の「カブリ数物連携宇宙研究機構」。文科省WPIプログラム委員会の評価書は、素粒子 ニュートリノを観測するスーパーカミオカンデでの業績に加え、数学や宇宙論など異分野を融合させた点を高く評価。「(米国の)プリンストン高等研究所に負けない成果」と指摘している。

一方、支援を終えるのは東北大の原子分子材料科学高等研究機構、京都大の物質—細胞統合システム拠点、大阪大の免疫学フロンティア研究センター、物質・材料研究機構の国際ナノアーキテクトニクス研究拠点の4拠点。「世界トップレベルという地位は確立した」と評価しつつ、予定の10年間で支援を終えると決めた。今後は各大学が独自運営していくことになる。

新聞宅配申し込み

デジタル申し込み

黒田が広島に与える効果

衣笠祥雄さんが「鉄人の目」で分析しています。



紙面にプラス

デジタル限定

企画・制作 朝日新聞社広告局

奈良先端大東京フォーラム2014

「未来の創造」

～最先端から見る未来予想図～

2014年10月15日 有楽町朝日ホール

未来を変革するイノベーションの
創出に必要な条件とは何か。

国立大学法人 奈良先端科学技術大学院大学

大学院入試情報 国士舘大学大学院

総合知的財産法学研究科

出願期間 **2/12 木 - 19 木**

