

# 量子重力の現状

または私は如何にして心配するのを止めて  
弦理論を愛するようになったか

立川裕二

2016年12月9日

# Disclaimer

- 「弦理論は量子重力の有力候補です」と良く言われる。
- 僕は弦理論をやっています。
- というわけでこういう講演を頼まれました。

# Disclaimer

- 「弦理論は量子重力の有力候補です」と良く言われる。
- 僕は弦理論をやっています。
- というわけでこういう講演を頼まれました。
  
- しかし、弦理論と言っても広いので、僕は量子重力としての弦理論は全然研究してません。
- じゃあ何故引き受けたのか？

- まあ、良く考えてなかったというのが本当のところですが、
- 自分ではバリバリ量子重力の研究をしていないからこそ、量子重力全般の現状について、多少公平に語れるのでは無いかと思います。
- 量子重力は未完の理論で、いろいろ流派があり、皆さん思い入れが強いので...

- このスライドは僕のホームページの**トーク一覧**のところにあがっています。
- ダウンロードすれば**この色**の文字および論文の画像はリンクになっていてクリック/タッチでブラウザが開きます。

重力は他の力とどう異なるか?



重力は量子化されるべきか?



重力は量子化できるか?



重力の量子化の方法は唯一か?

- アインシュタイン方程式、難しい偏微分方程式だけど、古典論。
- ブラックホールの存在。  
質量  $M$  の静的ブラックホールは半径

$$R = \frac{2G_N M}{c^2}$$

の地平面を持つ。

- 地球を潰すと 1cm ぐらい、太陽を潰すと 3km ぐらい。

# ブラックホールの第 X 法則

- **第一法則**:  $\kappa$  は表面重力、 $A$  は地平面の面積、 $\Phi$  は電気ポテンシャル、 $Q$  は電荷として

$$d(Mc^2) = \frac{c^2}{G_N} \frac{\kappa}{8\pi} dA + \Phi dQ$$

が成り立つ。

- **第二法則**:  $A$  は単調増大する。
- 古典微分方程式を解いて導出されたが、 $A$  をエントロピーと思えば熱力学に似ている。



- ブラックホールを古典重力背景として、その上の光子、電子等を量子力学的に扱うと、

$$T = \frac{\hbar}{k_B c} \frac{\kappa}{2\pi}$$

の熱輻射が出ているようにみえる。

- 大体重さに反比例。地球質量で **0.02 K**。
- これを**ホーキング輻射**という。

- すると第一法則はこうなる:

$$d(Mc^2) = \frac{c^2}{G_N} \frac{\kappa}{8\pi} dA + \Phi dQ$$

$$\Downarrow$$

$$dE = T dS + \Phi dQ$$

ただし

$$T = \frac{\hbar}{k_B c} \frac{\kappa}{2\pi}, \quad S = \frac{c^3 k_B}{G_N \hbar} \frac{A}{4}$$

- $7.2 \times 10^{-70} \text{m}^2$  あたり 1 ビット。
- 1 ビットのブラックホールは  $5\mu\text{g}$  ぐらい。
- $10\text{g}$  ぐらいのブラックホールがあると 1 テラバイト。

# 余談

プランク質量： $\sqrt{\hbar c/G_N} = 21\mu\text{g}$

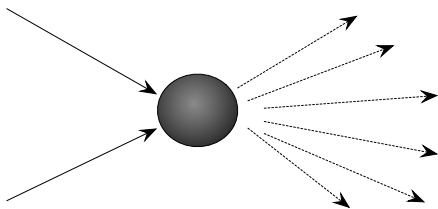
プランクエネルギー： $\sqrt{\hbar c^5/G_N} = 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV}$

プランク長さ： $\sqrt{G_N \hbar/c^3} = 1.6 \times 10^{-35} \text{ m}$

プランク時間： $\sqrt{G_N \hbar/c^5} = 5.4 \times 10^{-44} \text{ s}$

- 重力自身は非熱的に扱っているにもかかわらず、ブラックホールは温度とエントロピーを持つように見える。
- こんなことは Maxwell 力、強い力、弱い力では起きない。
- 重力は何かよりミクロスコピックな何かの疎視化だろうか？

- 物を非常に強くぶつけると、小さいブラックホールになって、ホーキング輻射で蒸発する:



- 「Blackhole information paradox」と呼ばれるが、僕は名前が良く無いと思う。
- この過程を記述する理論で万人を納得させるものはまだない。

重力は他の力とどう異なるか?



重力は量子化されるべきか?



重力は量子化できるか?



重力の量子化の方法は唯一か?

重力が量子力学的粒子に影響することは実験的に確認されている

PRL 112, 071101 (2014)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
21 FEBRUARY 2014

**Observation of the Spatial Distribution of Gravitationally Bound Quantum States of Ultracold Neutrons and Its Derivation Using the Wigner Function**

G. Ichikawa,<sup>1</sup> S. Komamiya,<sup>1</sup> Y. Kamiya,<sup>1</sup> Y. Minami,<sup>1</sup> M. Tani,<sup>1</sup> P. Geltenbort,<sup>2</sup> K. Yamamura,<sup>3</sup>  
M. Nagano,<sup>3</sup> T. Sanuki,<sup>4</sup> S. Kawasaki,<sup>5</sup> M. Hino,<sup>6</sup> and M. Kitaguchi<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Graduate School of Science, and International Center for Elementary Particle Physics,  
The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

<sup>2</sup>Institut Laue-Langevin, BP 156, 6, rue Jules Horowitz, 38042 Grenoble Cedex 9, France

<sup>3</sup>Research Center for Ultra-Precision Science and Technology, Graduate School of Engineering

でもこれはあくまで古典的な重力が外場として働いているばあい。

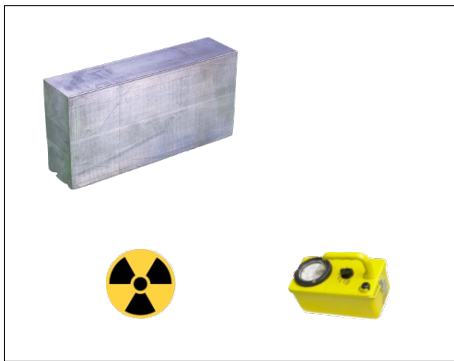
- 重力以外は量子的だけれど、重力は量子的でないかもしれない。
- 重力のみ量子的でないと思考実験をすると  
とても変なことになる。

$$\Delta\phi_{\text{重力}} = G_N(\text{質量分布})$$

ですが、右辺が重ね合わせの状態だったらどうするのか?

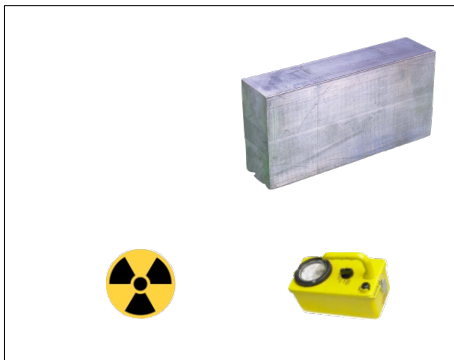


「シュレーディングの鉛ブロック」を考える。



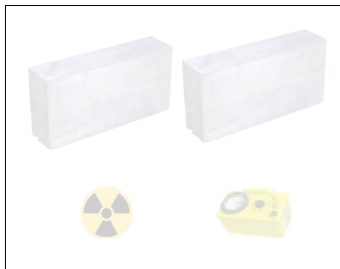
一定時間にガイガーカウンタが鳴らなかったら左

「シュレーディンガーの鉛ブロック」を考える。



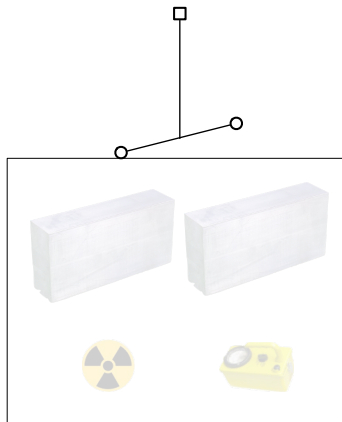
一定時間にガイガーカウンタが鳴ったら右

箱をとじたら重ね合わせの状態のはず。



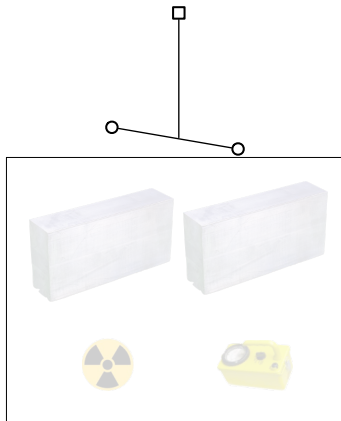
でも、中の鉛ブロックも重力ポテンシャルに影響します。

ねじりばかりを近づけるとどうなるか?



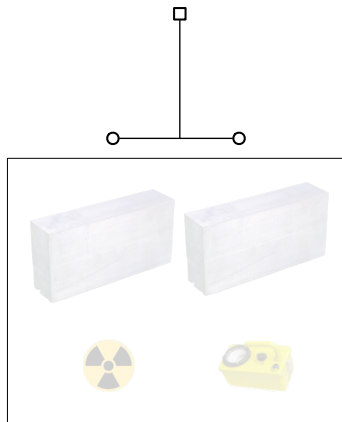
中の「真の」状態に従って左に振れたり

ねじりばかりを近づけるとどうなるか?



右に振れたりするのか?

ねじりばかりを近づけるとどうなるか？

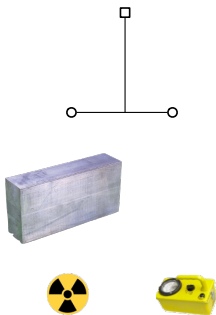


それとも、重ね合わせだから回らないのか？

勿論やってみないとわかりません。だが非常にナイーブに

$$\Delta\phi_{\text{重力}} = G_N \langle \text{質量分布} \rangle_{\text{量子力学的期待値}}$$

という式を書くと、箱を閉めなくても、重ね合わせでなくても、

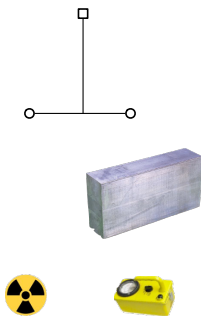


ということになる。平均ですからね。

勿論やってみないとわかりません。だが非常にナイーブに

$$\Delta\phi_{\text{重力}} = G_N \langle \text{質量分布} \rangle_{\text{量子力学的期待値}}$$

という式を書くと、箱を閉めなくても、重ね合わせでなくても、



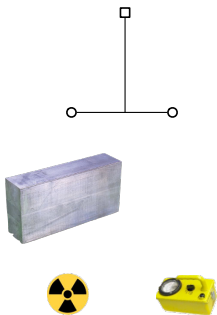
ということになる。平均ですからね。



勿論やってみないとわかりません。だが非常にナイーブに

$$\Delta\phi_{\text{重力}} = G_N \langle \text{質量分布} \rangle_{\text{量子力学的期待値}}$$

という式を書くと、箱を閉めなくても、重ね合わせでなくても、

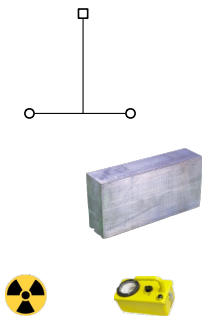


ということになる。平均ですからね。

勿論やってみないとわかりません。だが非常にナイーブに

$$\Delta\phi_{\text{重力}} = G_N \langle \text{質量分布} \rangle_{\text{量子力学的期待値}}$$

という式を書くと、箱を閉めなくても、重ね合わせでなくても、



ということになる。平均ですからね。

こんなはずはない!ので、すくなくとも、

$$\Delta\phi_{\text{重力}} = G_N \langle \text{質量分布} \rangle_{\text{量子力学的期待値}}$$

は駄目である。

こんなはずはない!ので、すくなくとも、

$$\Delta\phi_{\text{重力}} = G_N \langle \text{質量分布} \rangle_{\text{量子力学的期待値}}$$

は駄目である。という内容の論文がPRLに出ている:

VOLUME 47, NUMBER 14

PHYSICAL REVIEW LETTERS

5 OCTOBER 1981

### Indirect Evidence for Quantum Gravity

Don N. Page

*Department of Physics, The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania 16802*

and

C. D. Geilker

*Department of Physics, William Jewell College, Liberty, Missouri 64068*

(Received 9 June 1981)

An experiment gave results inconsistent with the simplest alternative to quantum gravity, the semiclassical Einstein equations. This evidence supports (but does not prove) the hypothesis that a consistent theory of gravity coupled to quantized matter should also have the gravitational field quantized.

一応ちゃんとねじりばかりが回るという実験をやったらしい。

tum semiclassical theory, and no correlations with the particular mass configuration in our component of the wave function.

eight The series of ten experimental runs gave 30-  
g sec  $\gamma$ -ray counts with means and standard devia-  
sly tions  $1509.1 \pm 31.0$  and  $887.6 \pm 23.0$  for the two  
a- respective Geiger counters. The fluctuations  
the are consistent with Poisson statistics and thus  
in- were attributed to the quantum mechanics of the  
g radioactive decays and detections. There was a  
be negligible background count rate when the cobalt-  
eci- 60 source was removed. The ratios of counts in  
e- the two counters in our present component of the  
dis- wave function gave the sequence of decisions  
n-  $\alpha, \alpha, \alpha, \beta, \beta, \alpha, \beta, \alpha, \beta, \beta,$  and the masses were  
ng set in the appropriate configurations. During  
n each run the torsion balance responded to each  
natic repositioning of the masses and then underwent  
t damped oscillations with a mean period of 710  
roc- sec. By fitting the extrema of the oscillations  
s to exponentially decaying sine waves during each  
e half-hour, the change in the equilibrium position  
near- (of the reflected light beam on the distant scale)  
e- as the large balls were moved from *A* to *B* or *B*  
ese to *A* was determined. The changes in equilibria  
ion (in cm) we measured were  $-61.3, -63.9,$   
pli-  $-36.0, +69.2, +36.1, -48.8, +46.4, -45.2,$   
ra-  $+51.3, \text{ and } +59.6.$

pli- Although the sensitive torsion balance was af-  
bles, fected by temperature changes, vibrations, and  
t other factors not under our control, so that the

ともかく、ナイーブな

$$\Delta\phi_{\text{重力}} = G_N \langle \text{質量分布} \rangle_{\text{量子力学的期待値}}$$

よりまともな式を、重ね合わせ状態にも適用出来るような形で、**重力を量子化せずに書けるか?** というのは難しい。  
興味のある方は考えてみてください。

というわけで、重力も量子化しておいたほうがよいのではなからうか。

重力は他の力とどう異なるか?



重力は量子化されるべきか?



**重力は量子化できるか?**



重力の量子化の方法は唯一か?

- というわけで、重力を量子化できるかを考えよう。
- しかし、重力はこの世の四つの力

電磁力, 弱い力, 強い力, 重力

のうちの一つ。

- まず、残りの三つの現状を思いだそう。



- **電磁力**: 光。僕がいま皆さんに見えているのもこれのお蔭。
- **弱い力**: 原子核の  $\beta$  崩壊の原因。
- **強い力**: クォークを核子にまとめる。

これらはどれも「ゲージ理論」という枠組みで記述される。

一方で重力は「一般相対論」という枠組み。

そんなに遠いものではない。

- 電磁力の量子化:  
1950 年前後、朝永-Schwinger-Feynman。
- 弱い力, 強い力の量子化:  
1970 年前後、't Hooft-Veltman。

「できた」といっても、物理屋としてのレベルで、数学者が満足するレベルでない。

「強い力の量子化と閉じ込めの証明」は 2000 年に発表された **Clay Millennium Prize** の一つで、賞金一億円。未解決。

とりあえず物理屋のレベルで考えることにする。

- 重力も場の理論の一種なので、強い力の量子化に使った「標準的な手法」を適用してみることは出来る。
- うまくいかない。
- 何がうまくいかない本質なのか知る為に、考えを広げてみる。
- この世は 4 次元だけでも、  
他の  $d$  次元時空での重力理論や強い力を  
理論的に考えることはできる。  
それらを「標準的な手法」で量子化しようとするとうどうなるか?

やってみると:

次元	1	2	3	4	5	6	...
強い力	✓	✓	✓	✓	✗	✗	
重力	✓	✓	△	✗	✗	✗	

✓ : うまくいく。

△ : 微妙。

✗ : 一般の物理量の計算は発散が出て破綻する。

- 四次元の重力の量子論に「標準的な手法」を適用すると、一般の物理量の計算は破綻するが、  
問題なく普通に計算できる量もある。
- 例えば、ニュートンポテンシャルの補正は

$$V(r) = -\frac{G_N m_1 m_2}{r} \left[ 1 - \underbrace{\frac{G_N(m_1 + m_2)}{rc^2}}_{\text{一般相対論の補正}} - \underbrace{\frac{135 G_N \hbar}{30\pi^2 r^2 c^3}}_{\text{最初の量子補正}} + \dots \right]$$

- 詳細は **Donoghue** のレビュー **gr-qc/9512024** 等を参照。

4次元重力の量子化での一般の物理量の計算を  
「標準的な手法」でやろうとすると破綻するのは事実。

何か別の方法を考えないといけない。

現時点では:

- ループ量子重力
- 弦理論
- その他沢山...

# ループ量子重力

- 基本的な場の変数を計量  $g_{\mu\nu}$  から「ループ変数」にとりかえて、量子化を真面目にする。(80年代後半から、Ashtekharら。)
- 一般共変性をもった四次元の理論は出来ているようではある。
- 古典極限を取って元の一般相対論を取り出すことがまだ出来ない。
- 例えば平らな時空  $\mathbb{R}^{3,1}$  周りの重力波の散乱がまだ記述できない。
- 将来出来るかも知れないし、出来ないかも知れない。



- ブラックホールのエントロピーはどうか?
- 量子化の詳細に出てくる古典論には現れない  
Barbero-Immirzi パラメタ  $\gamma$  というものがある、

$$S = \gamma^{-1} A$$

となる。

- 古典一般相対論では

$$S = \frac{A}{4}$$

だから、 $\gamma = 4$  のときだけ古典極限が取れるはず。  
しかしその詳細は判っていない。

- ブラックホールの蒸発はよくわかっていない。

# 弦理論

もともと 1960 から 1970 年代の強い力の理論的研究には二派あった。

- **Yang-Mills 理論** : 強い力は **SU(3)** ゲージ理論である。
- **(当時の) 弦理論** : 強い力は相対論的な弦の量子力学である。

しばらくして、

- **Yang-Mills 理論** は正しく実験的に強い力を記述する。
- **弦理論** は強い力の実験とは**合わないが、量子重力を含む**。

ということがわかった。

言わば、たなぼた的に量子重力理論が得られた。

もうすこし詳しく言うと、次のような状況。

- 相対論的弦の量子化を丁寧にやると、量子重力を含むとわかる。時空は  $10 = 9 + 1$  次元でないといけないことがわかる。
- 四次元の時空にしようと思うと、 $6 = 10 - 4$  次元の部分は現在の実験ではまだ見つからないくらい小さいはず:

$$\mathbb{R}^{3,1} \times X_6$$

- 通常素粒子物理では四次元で Lagrangian を書くことから始める:

$$\mathcal{L}_{4d} = (\text{標準模型}) + (\text{インフラトン}) + (\text{ダークマター}) + \dots$$

- 弦理論では Lagrangian を勝手に書く余地は無い。そのかわり

$$\mathbb{R}^{3,1} \times X_6$$

の  $X_6$  を選べる。大体

$$X_6 \text{ の選び方} \longrightarrow \mathcal{L}_{4d} \text{ の選び方}$$

と思えばよい。

すると、

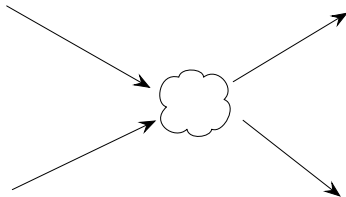
- $X_6$  をうまく選んで  $\mathcal{L}_{4d} = \text{標準模型} + \alpha$  を出せるか?
- 出せるとして、 $X_6$  の選択肢は唯一か?

というのが問題になるが、1984年に超弦理論の大枠が出来て30年経った今でもどちらも未解決。

「弦理論には予言能力は無い」と良く言われる原因。

でも、 $X_6$  に殆ど依らない予言もあります。  
例えば重力子の散乱振幅は  $X_6$  に依らず

$$A_{\text{重力子}}(s, t, u) =$$



$$= (\text{古典散乱振幅}) \times \frac{\Gamma(1 - \alpha's)\Gamma(1 - \alpha't)\Gamma(1 - \alpha'u)}{\Gamma(1 + \alpha's)\Gamma(1 + \alpha't)\Gamma(1 + \alpha'u)}$$

但し  $\alpha'$  は弦の張力を指定するパラメタで、 $M_{\text{Planck}}^2$  ぐらい。

$s, t, u$  は素粒子論で学ぶマンデルスタム変数。  
(だいたい衝突エネルギーの 2 乗だと思ってください。)

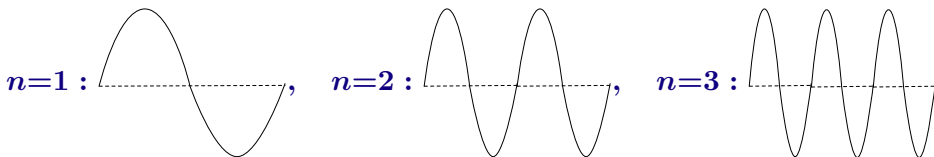
## 散乱振幅

$$A_{\text{重力子}}(s, t, u) = (\text{古典散乱振幅}) \times \frac{\Gamma(1 - \alpha's)\Gamma(1 - \alpha't)\Gamma(1 - \alpha'u)}{\Gamma(1 + \alpha's)\Gamma(1 + \alpha't)\Gamma(1 + \alpha'u)}$$

の分母の極から、質量が

$$m^2 = n/\alpha', \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

で与えられる重い粒子のタワーがあることが判ります。  
これらは弦の励起状態です。





- ブラックホールエントロピーはどうか?
- 極限ブラックホール (電荷や角運動量を最大限持ったブラックホール) に関しては、対応する統計力学系が弦理論の中にあって、きちんと

$$S = \frac{A}{4}$$

と古典重力理論の結果と合うものが得られる。

- 一般のブラックホールに関しては未解決。
- ブラックホールの蒸発もよくわかっていない。

重力は他の力とどう異なるか?



重力は量子化されるべきか?



重力は量子化できるか?



**重力の量子化の方法は唯一か?**

## ここまでのまとめ

重力は量子化できるか? という問いを考えていた。

## ここまでのまとめ

### ループ量子重力:

- 一般共変な量子力学系だが、巨視的な四次元空間を古典極限にもつかわからない。
- ブラックホールのエントロピーは  $S = A/\gamma$  と出るが、古典極限で正しいはずの  $\gamma = 4$  が何故選ばれるかは判っていない。
- ブラックホールの蒸発もよくわからない。

# ここまでのまとめ

## 弦理論:

- たなぼたで得られた理論で、10次元の量子重力を含む。四次元を考えようと思うと六次元の内部空間  $X_6$  を選ばないといけないが、これが標準模型と合うように選べるかはわからない。
- しかし、 $X_6$  に依らず、重力子の散乱は予言できる。
- 極限ブラックホールのエントロピーはきちんと  $S = A/4$  が出るが、一般のブラックホールに関してはわからない。
- ブラックホールの蒸発もよくわからない。

## ここまでのまとめ

他のアプローチもいろいろあります。

最近では、量子情報の観点から量子重力を理解しよう、という試みが世界的には非常に熱い。でも日本人でやっているのはあんまりいない。

世界の流行を追わないという意味では堅実だが、もうちょっと誰かやってもいいんではと思う。

今日はその話をしないですいません。日本語で聞きたければ、基研の**高柳匡さん**かペリメタ研の**吉田紅さん**か東北大の**堀田さん**かカルテクの**大栗さん**あたりを呼んでください。

じゃあ、あなたが、量子重力を研究したいと思ったとき、どのアプローチを選ぶか?

現時点で、一般向け啓蒙書や専門書を開いてイントロを読むと、名指しはしませんが、こうなります:

- **ループ量子重力の本:** 哲学的な観点からして、我々のアプローチが正しいはずだ。なぜならば、うんたらくんたら、云々
- **弦理論の本:** (ループ量子重力の存在を無視して) 現時点では量子重力を含む理論は弦理論しかないので、当然これが現実の重力の量子化であるはずだ。よってみな弦理論をやるべきだ、うんたらくんたら、云々

ちょっとどうかと思う。

特定の量子化の方法によらず、単に

- 一般相対論である。
- 量子論である。

ということだけから何が論理的に導出できるか、を考えてみよう。



その前に、一見違う話をします。

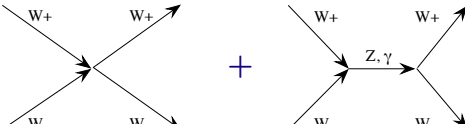
- W ボゾンは 1983 年にみつかった。
- Higgs ボゾンは 2012 年にみつかった。

実は、

- W ボゾンがある。
- 量子論では確率は 1 を超えない。
- 摂動計算が有効である。

という前提から、何か追加でボゾンがないと理論が破綻することが論理的に示せます。

何故か? W ボゾンの四点散乱を考える:

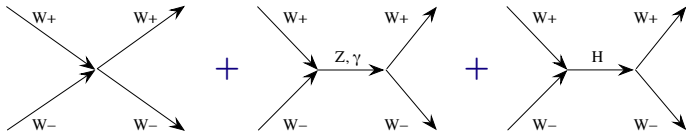
$$A(s, t, u)_{\text{Higgs なし}} = \text{Diagram 1} + \text{Diagram 2}$$


は高エネルギー極限で  $\sim s/m_W$ .

$A$  の二乗が散乱振幅だから、 $s$  が大きい所では**確率が1を超える**。

Higgs ボゾンがあると:

$$A(s, t, u)_{\text{Higgs あり}} =$$



は高エネルギー極限で  $\sim$  定数。確率が1を超えない。

これ以外にも、確率が1を超えなくする方法はあるかもしれないが、兎に角 W, Z ボゾンだけではどうしようもない。

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 16, NUMBER 5

1 SEPTEMBER 1977

### Weak interactions at very high energies: The role of the Higgs-boson mass

Benjamin W. Lee,\* C. Quigg,<sup>†</sup> and H. B. Thacker

*Fermi National Accelerator Laboratory,<sup>‡</sup> Batavia, Illinois 60510*

(Received 20 April 1977)

We give an  $S$ -matrix-theoretic demonstration that if the Higgs-boson mass exceeds  $M_c = (8\pi\sqrt{2}/3G_F)^{1/2}$ , parital-wave unitarity is not respected by the tree diagrams for two-body scattering of gauge bosons, and the weak interactions must become strong at high energies. We exhibit the relation of this bound to the structure of the Higgs-Goldstone Lagrangian, and speculate on the consequences of strongly coupled Higgs-Goldstone systems. Prospects for the observation of massive Higgs scalars are noted.

追加のボゾンの質量の上限も 1TeV 以下と評価出来る。

では重力の場合は? ということ最近になって Arkani-Hamed, Huang が考えた。論文は未発表だが国際会議でいろいろ講演を行っている。

重力だけだと

$$A(s, t, u)_{\text{重力のみ}} = \text{[Diagram 1]} + \text{[Diagram 2]}$$

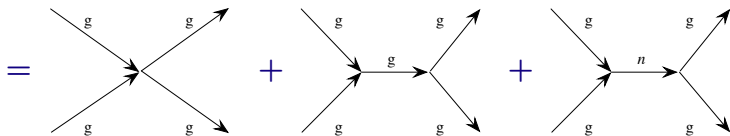
高エネルギー極限で確率が1を超える。

追加の重い粒子があつて確率が1を超えないとするとどうなるか?

- $m^2 = 1/\alpha'$  なる重い粒子を追加。  
微妙におかしくなる。
- そのため、 $m^2 = 2/\alpha'$  なる粒子を足さないといけない。  
微妙におかしくなる。
- そのため、 $m^2 = 3/\alpha'$  なる粒子を足さないといけない。  
微妙におかしくなる。
- くりかえし...

結局、 $m^2 = n/\alpha'$ 、但し  $n$  は自然数、となるような粒子を全部足さないといけないことがわかる:

$A(s, t, u)$  全部こみ



は確率が1を超えない。



弦理論はこの一例:

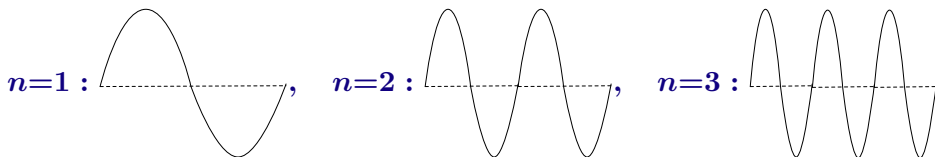
$$A_{\text{重力子}}(s, t, u) = (\text{古典散乱振幅}) \times \frac{\Gamma(1 - \alpha' s)\Gamma(1 - \alpha' t)\Gamma(1 - \alpha' u)}{\Gamma(1 + \alpha' s)\Gamma(1 + \alpha' t)\Gamma(1 + \alpha' u)}$$

分母の極から、質量が

$$m^2 = n/\alpha', \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

で与えられる重い粒子のタワーがあることが判る。

これらは弦の励起状態でした。



何にせよ、W-ボゾンの理論が Higgs ボゾンで救われたように  
重力の量子論が粒子の追加で救われるならば、追加の粒子は

$$m^2 = n/\alpha'$$

という塔をなす。弦理論は特に

$$A_{\text{重力子}}(s, t, u) = (\text{古典散乱振幅}) \times \frac{\Gamma(1 - \alpha's)\Gamma(1 - \alpha't)\Gamma(1 - \alpha'u)}{\Gamma(1 + \alpha's)\Gamma(1 + \alpha't)\Gamma(1 + \alpha'u)}$$

という振幅をあたえる。

弦理論でないとしても、弦の励起のような塔がある。

だから、「弦理論には予言能力は無い」と言わないで！

さっさと重力子加速器を作って、ぶつけて、散乱結果を測定してください。

それが前頁の予言と合えば弦は OK、合わなければ実験的に弦理論は棄却です。

弦理論でなくても、

- プランクスケール近辺に追加の粒子が無限に存在するか、
- 摂動論が破綻するか、

どちらかなのは論理的に保証されています。

「重力子加速器なんか作れるか」と言わないで！

Heisenberg の不確定性関係の議論にあるように、  
原理的に出来ない実験というのがありますが、これはそうじゃない。

安直にやろうとすると、バカでかいサイズとお金と人的資源と  
時間が必要なだけです。

自分独りの人生の間に終わりそうにないからといって何ですか！  
それはあまりに近視眼的に過ぎます。

AD 100 ごろアルmageストを書いたアレキサンドリアの天文学者  
**プトレマイオス**はバビロニアでの天体観測の BC700 ぐらいからの  
800 年分の蓄積を利用して当時の天文学的知識を集大成しました。

ギリシャの**原子論が実験で確認されるまでは千数百年。**

それから文明が進んで、科学の進歩も速くなったのはいいですが、  
心が急いでばかりではいけません。

のんびり、十数世代掛けてやるぐらいの鷹揚さが必要なのでは。

日本でも伊勢神宮の式年遷宮は 1300 年ぐらいやってるので、  
出来ないことはない。

## まとめ

- 重力は変である。
- でも量子化したほうが良さそうである。
- 量子重力について、理論的にわかっていることもあるし、わからないこともある。
- 流派がいろいろあって、仲が悪いけれど、流派によらず成り立つこともある。
- 現状では測りようもないが、実験的予言もある。
- 焦らず、のんびり、やりましょう。