

ノーベル賞緊急講演会

— ヒッグス粒子の正体に迫る! —

ヒッグス機構とヒッグス粒子

倉知昌史

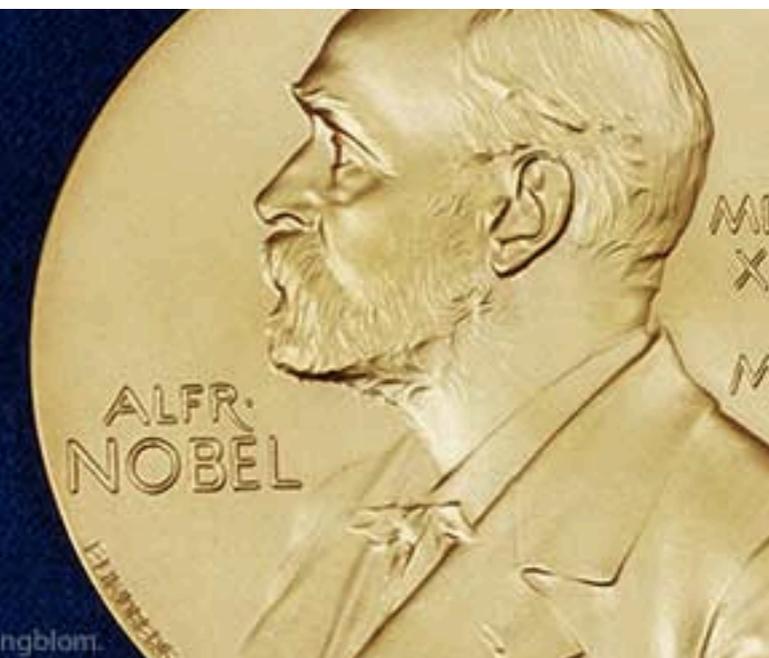
名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構

(KMI)



2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert Peter W. Higgs



© The Nobel Foundation. Photo: Lovisa Engblom.

2013年、ノーベル物理学賞

受賞者：フランソワ・アングレア
ピーター・W・ヒッグス

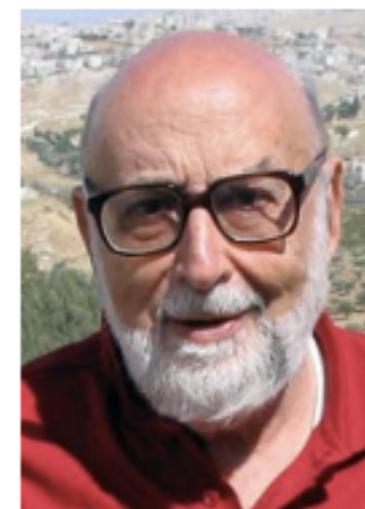


Photo: Pnicolet via
Wikimedia Commons

François Englert



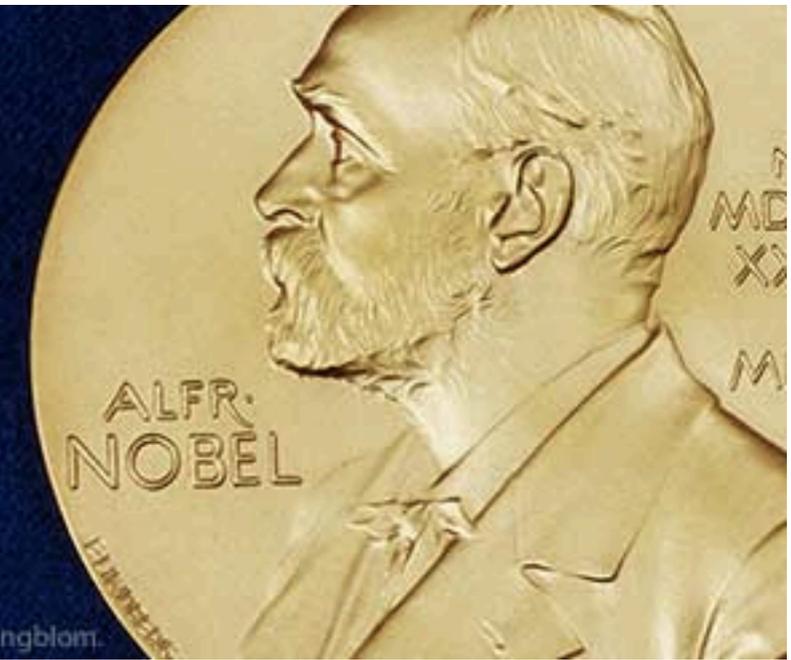
Photo: G-M Greuel via
Wikimedia Commons

Peter W. Higgs

受賞理由：（直訳） 予言した**新粒子**がCERNのLHCにおけるATLAS、
CMS実験により見つけられたことにより、その正しさが確かめられた**素粒子**
の質量起源に関する我々の理解に寄与する機構の理論的発見

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert
Peter W. Higgs



© The Nobel Foundation. Photo: Lovisa Engblom.

2013年、ノーベル物理学賞

受賞者：フランソワ・アングレア
ピーター・W・ヒッグス

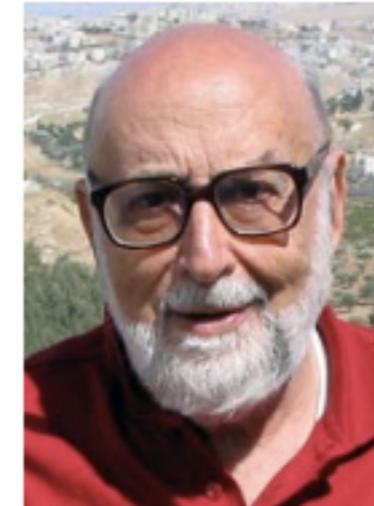


Photo: Pnicolet via
Wikimedia Commons
François Englert

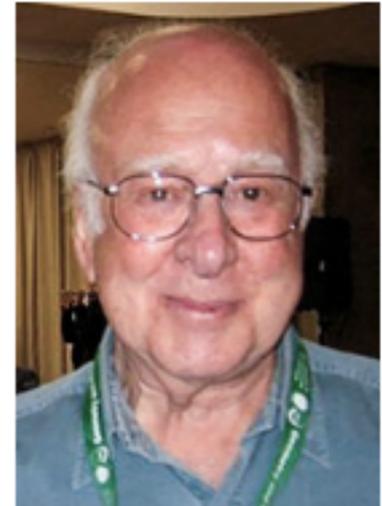


Photo: G-M Greuel via
Wikimedia Commons
Peter W. Higgs

受賞理由：（ようするに）

ヒッグス機構の理論的発見と

ヒッグス粒子の存在の予言

ノーベル賞のもとになった論文

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

Phys. Rev. Lett. **12**, 266 (1964)

BROKEN SYMMETRIES, MASSLESS PARTICLES AND GAUGE FIELDS

P. W. HIGGS

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Scotland

Received 27 July 1964

Phys. Lett. **12**, 132 (1964)

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

Phys. Rev. Lett. **13**, 508 (1964)

ノーベル賞のもとになった論文 約半世紀前！！

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

Phys. Rev. Lett. **12**, 266 (1964)

BROKEN SYMMETRIES, MASSLESS PARTICLES AND GAUGE FIELDS

P. W. HIGGS

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Scotland

Received 27 July 1964

Phys. Lett. **12**, 132 (1964)

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

Phys. Rev. Lett. **13**, 508 (1964)

ノーベル賞のもとになった論文

短い！！

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

Phys. Rev. Lett. **12**, 266 (1964)

約2.5ページ

BROKEN SYMMETRIES, MASSLESS PARTICLES AND GAUGE FIELDS

P. W. HIGGS

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Scotland

Received 27 July 1964

Phys. Lett. **12**, 132 (1964)

約1ページ

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

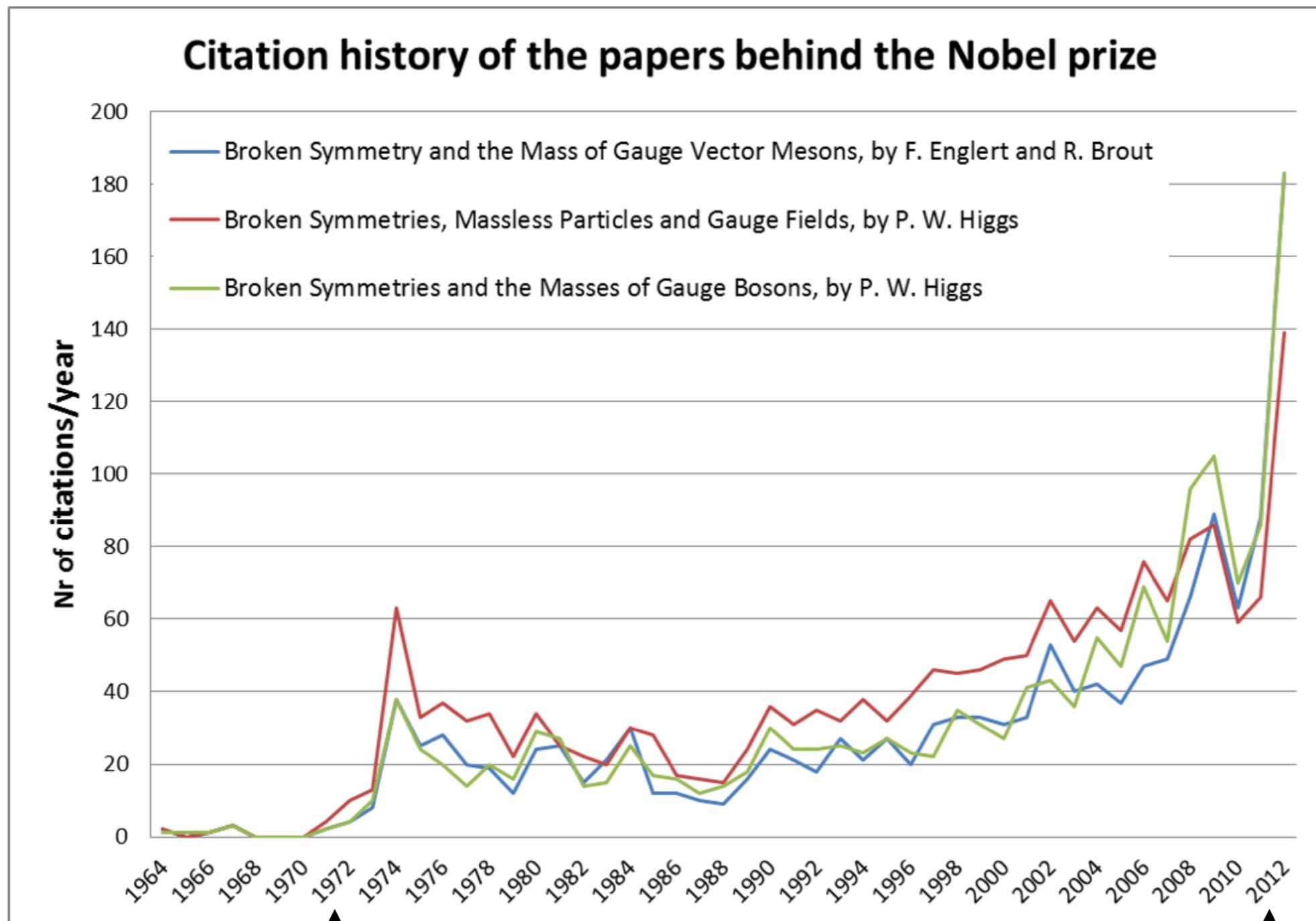
Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

Phys. Rev. Lett. **13**, 508 (1964)

約1.5ページ

ノーベル賞のもとになった論文の被引用数



↑
't Hooft, Veltman による繰り込み可能性の証明 (1999年ノーベル賞)

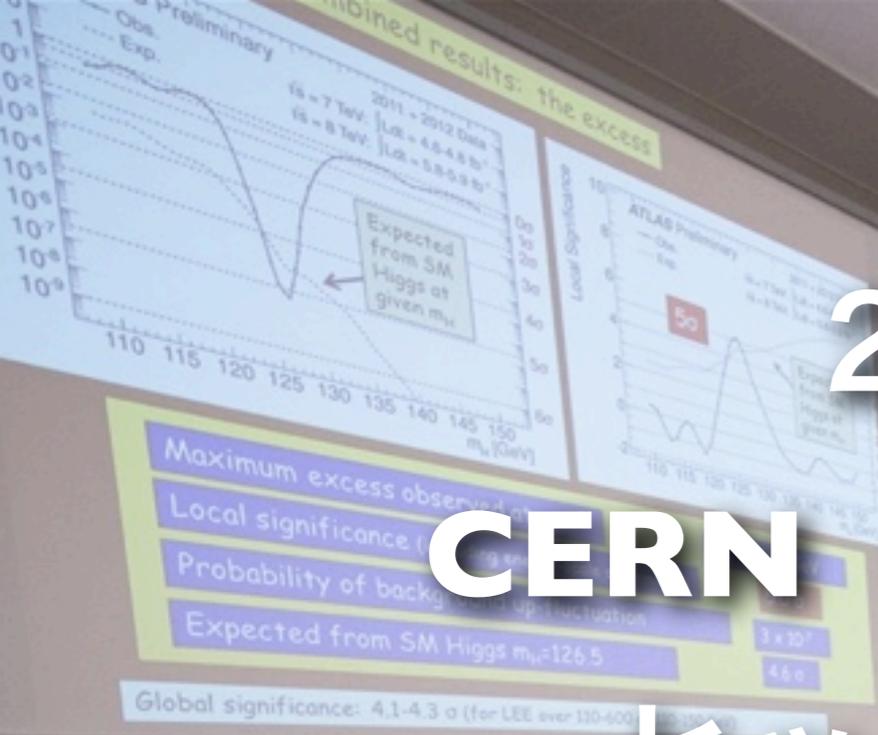
↑
この年に何があったかはみなさんご存知ですよ？



2012年7月4日

CERN (欧州原子核研究機構) が

ヒッグス粒子の発見を発表



2012年7月4日

それはアンブレア氏とヒッグス氏が
初めて会った日でもあった



François Englert と Peter Higgs が初めて会った日の写真
2012年7月4日、CERNにて

Photo: CERN, <http://cds.cern.ch/record/1459503>

本講演の目的

今年のノーベル物理学賞の受賞理由となった
ヒッグス機構とは何か、**ヒッグス粒子**とは何か
について少しでもイメージを持ってもらい、
戸本さん、青木さんの講演につなぐ

そのために、できるかぎり、つくり話や
似たような物理現象による解説でなく、
ヒッグスそのものについて説明したい。

本講演の目的

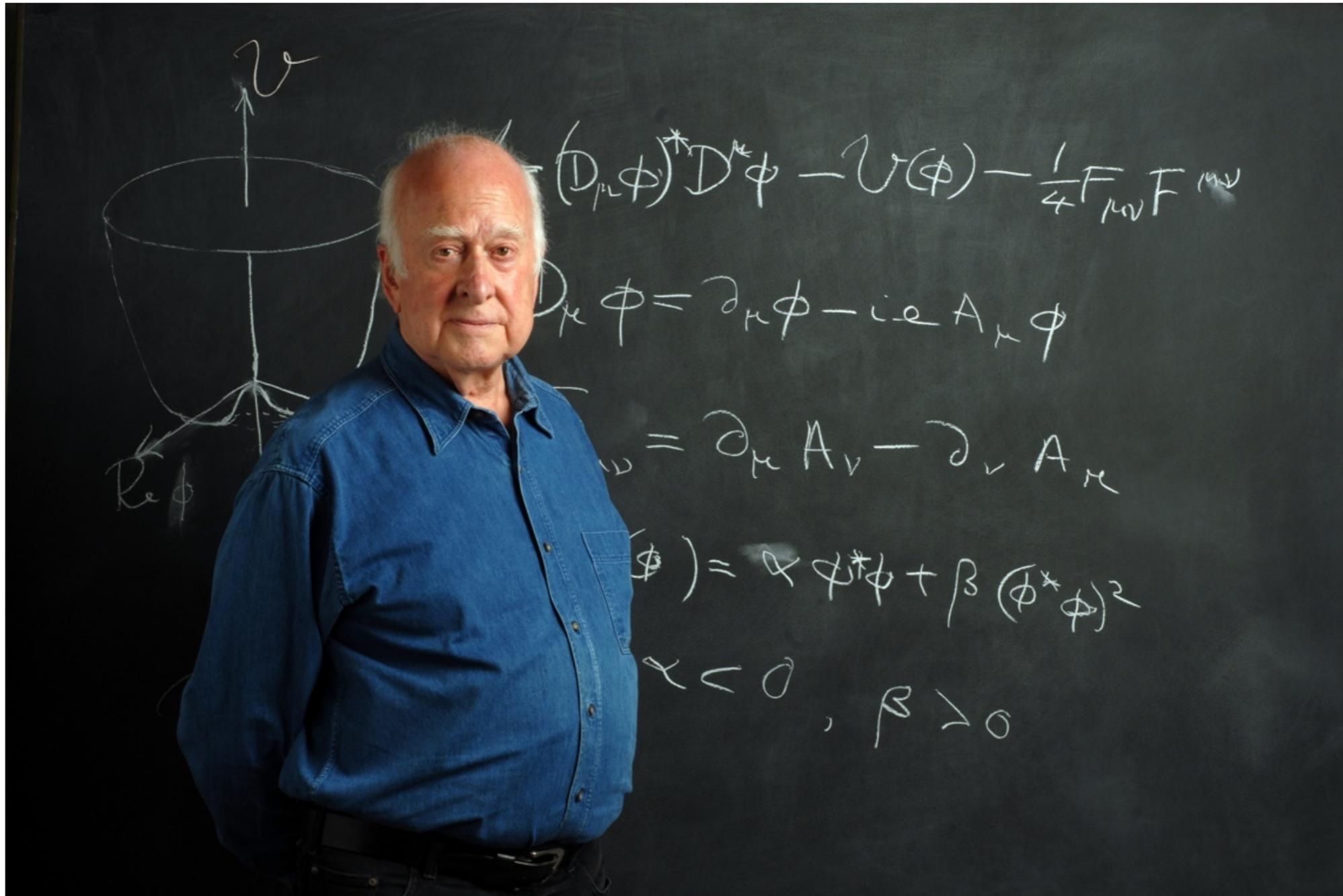


Photo: <http://www.ph.ed.ac.uk/higgs/galleries/peter-higgs-june-2009>

本講演のながれ

素粒子とはなにか ★

素粒子論とはなにか ★★

質量とはなにか ★★

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

対称性の自発的破れとはなにか ★★★

ヒッグス機構とヒッグス粒子 ★★★★★

本講演のながれ

素粒子とはなにか ★

素粒子論とはなにか ★★

質量とはなにか ★★

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

対称性の自発的破れとはなにか ★★★

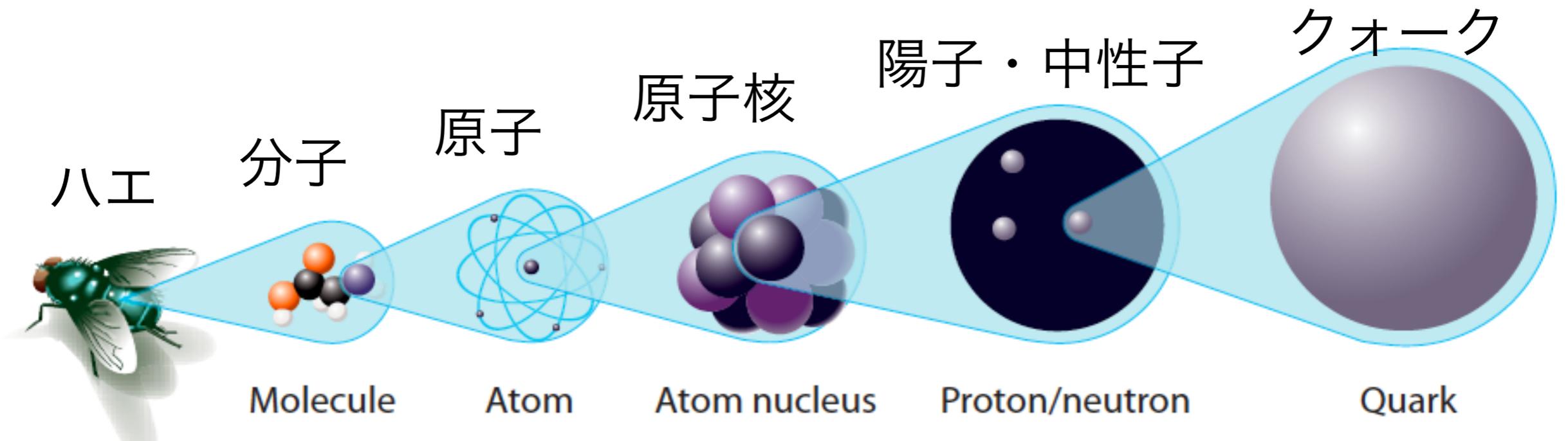
ヒッグス機構とヒッグス粒子 ★★★★★

★ の数は説明の難易度を表す

素粒子とはなにか

素粒子とはなにか ☆

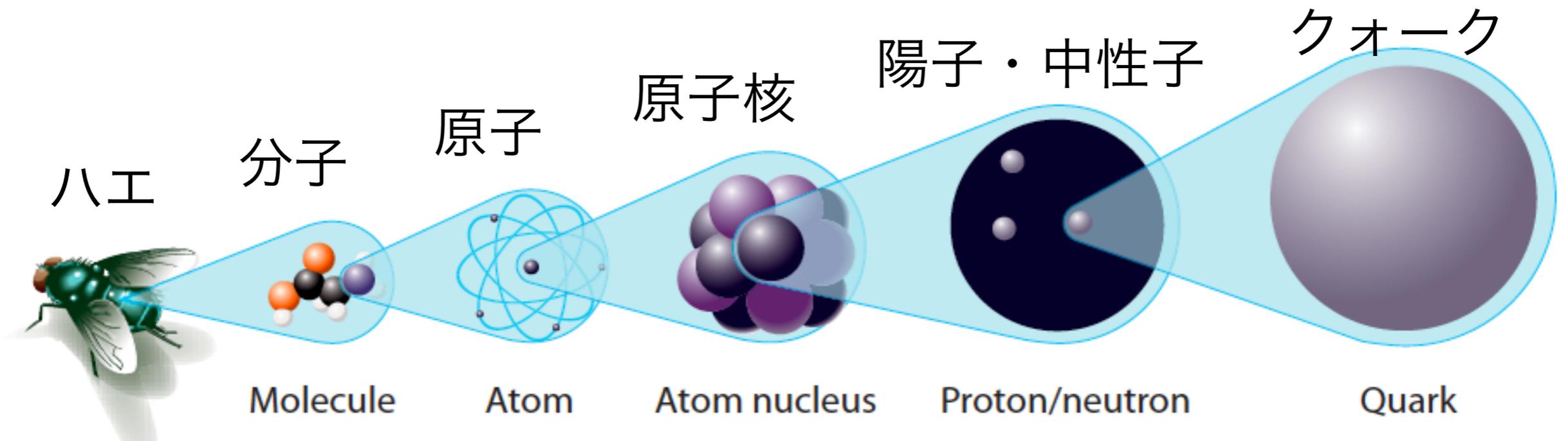
素粒子とはなにか ☆



http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/popular-physicsprize2008.pdf より

それ以上分割することができない、
この世の全てのものを作っている基本粒子

素粒子とはなにか ☆



http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/popular-physicsprize2008.pdf より

それ以上分割することができない、
この世の全てのものを作っている基本粒子

現実的には、その時代の実験技術、理論的知識からして、
大きさのない点粒子とみなしてしまってもよいもの

素粒子論とはなにか

素粒子論とはなにか ☆☆

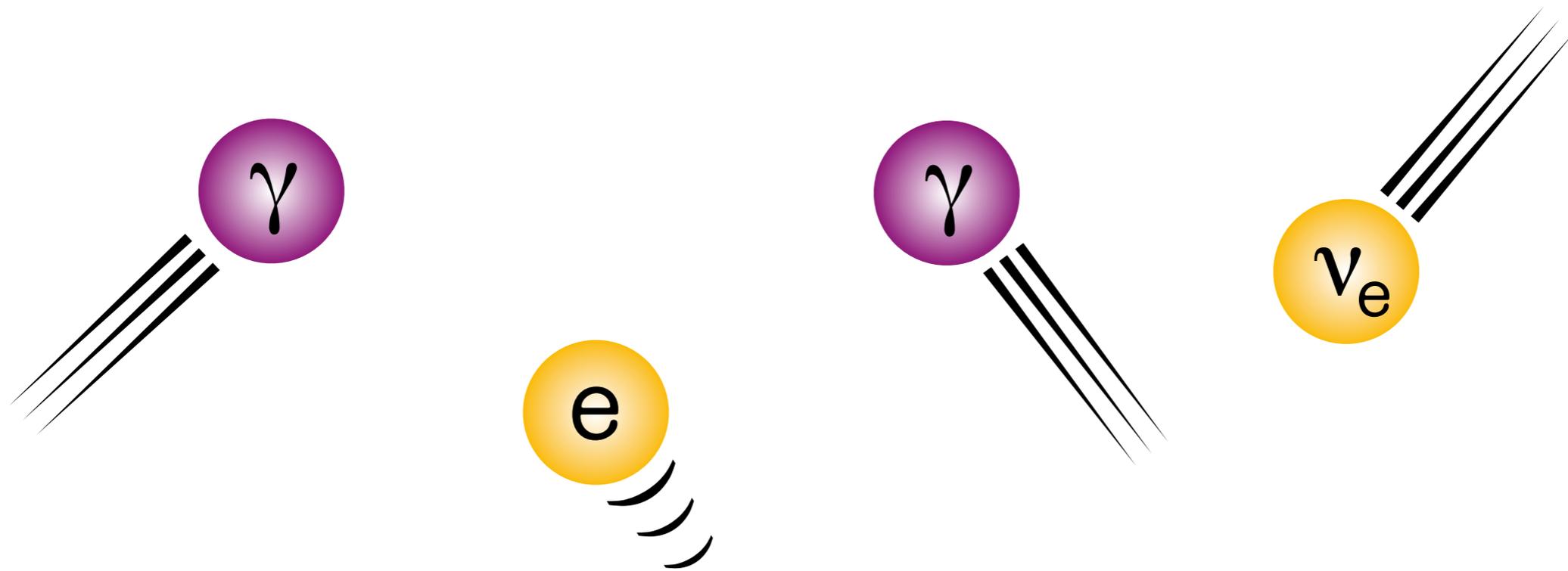
素粒子論とはなにか ☆☆

(素粒子論の研究をするとは一体どういうことか)

素粒子論とはなにか ☆☆☆

(素粒子論の研究をするとは一体どういうことか)

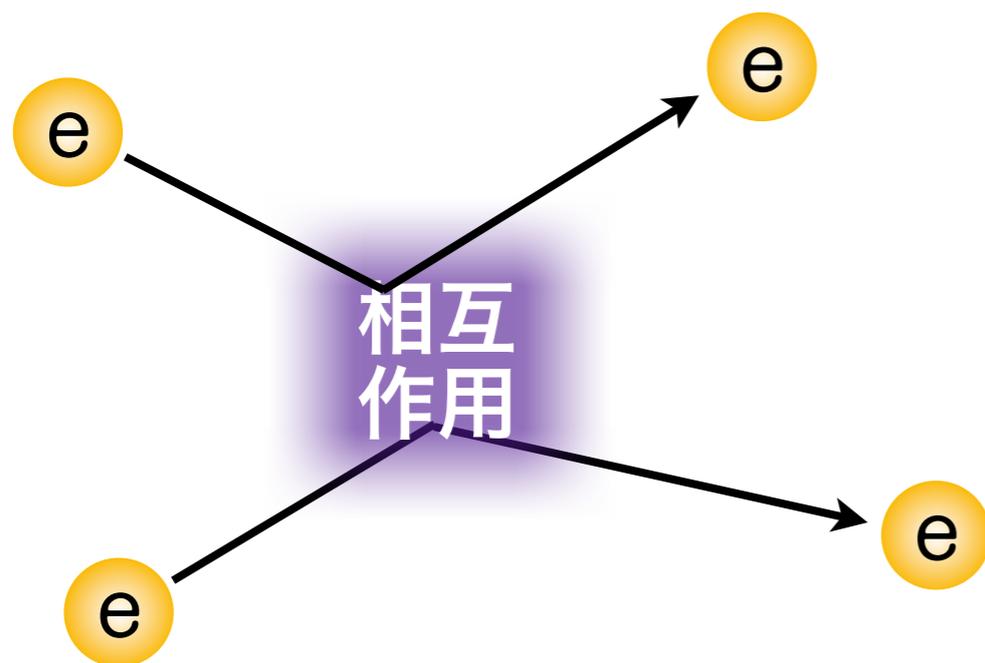
- この世の中はどれだけの種類の素粒子からできているのか
(できるだけ少ないほうがうれしい)
- それらの素粒子はどのような性質を持っているのか
(重いのか、軽いのか、なにか特殊な性質をもっているのか)



素粒子論とはなにか ☆☆☆

(素粒子論の研究をするとは一体どういうことか)

- この世の中はどれだけの種類の素粒子からできているのか
(できるだけ少ないほうがうれしい)
- それらの素粒子はどのような性質を持っているのか
(重いのか、軽いのか、なにか特殊な性質をもっているのか)
- それらの素粒子同士はどのように相互作用するのか

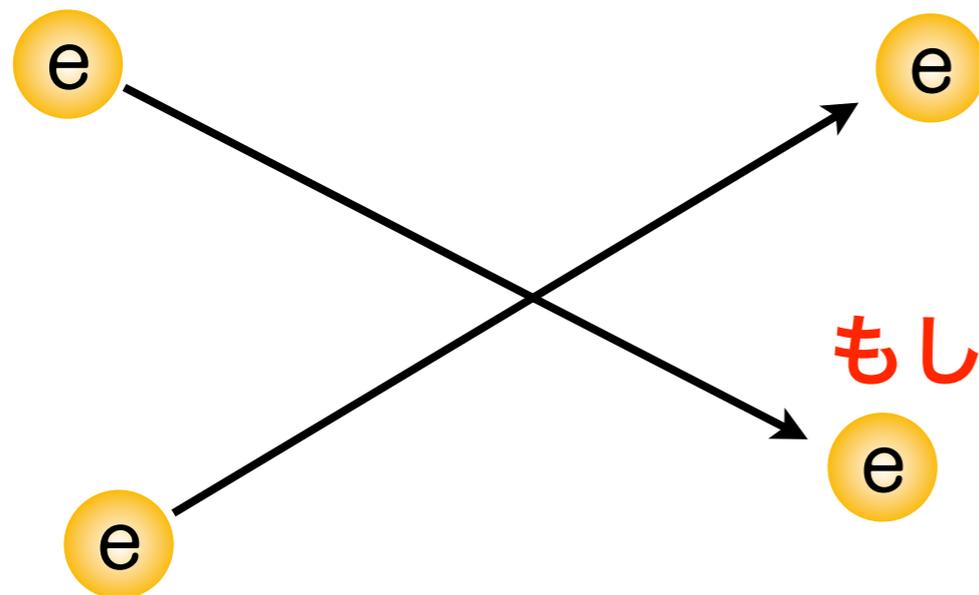


お互いの運動に、影響を及ぼしあうという意味

素粒子論とはなにか ☆☆☆

(素粒子論の研究をするとは一体どういうことか)

- この世の中はどれだけの種類の素粒子からできているのか
(できるだけ少ないほうがうれしい)
- それらの素粒子はどのような性質を持っているのか
(重いのか、軽いのか、なにか特殊な性質をもっているのか)
- それらの素粒子同士はどのように相互作用するのか



お互いの運動に、影響を及ぼしあうという意味

もし相互作用がなければ

素粒子論とはなにか ★★

(素粒子論の研究をするとは一体どういうことか)

- ・ この世の中はどれだけの種類の素粒子からできているのか
(できるだけ少ないほうがうれしい)
- ・ それらの素粒子はどのような性質を持っているのか
(重いのか、軽いのか、なにか特殊な性質をもっているのか)
- ・ それらの素粒子同士はどのように相互作用するのか

これらを正しく知れば、この世の中がどのようにできているかがわかり、この世の中でおこる全ての物理現象を説明できると考える、、、それが素粒子論

素粒子論とはなにか ★★

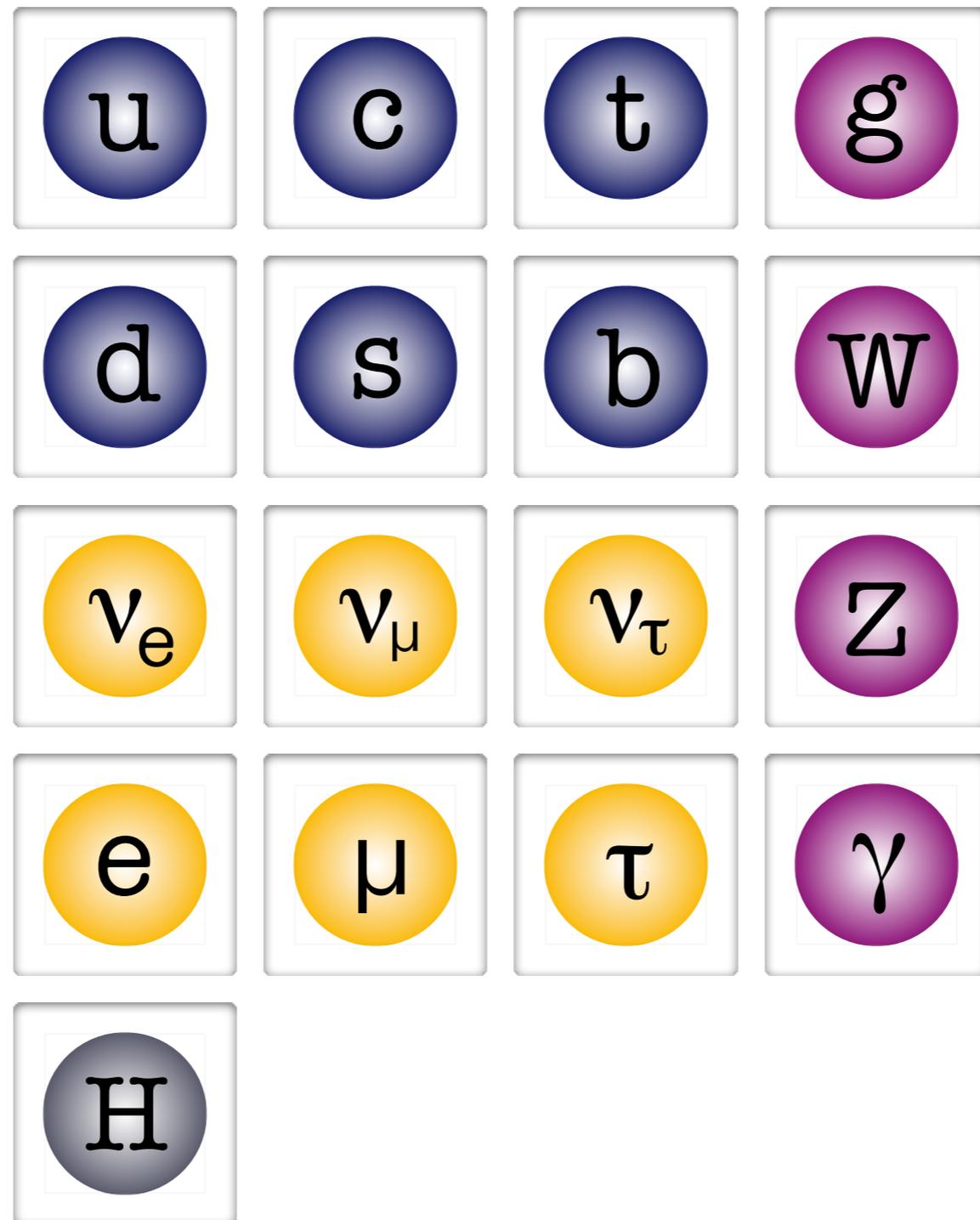
(素粒子論の研究をするとは一体どういうことか)

- この世の中はどれだけの種類の素粒子からできているのか
(できるだけ少ないほうがうれしい)
- それらの素粒子はどのような性質を持っているのか
(重いのか、軽いのか、なにか特殊な性質をもっているのか)
- それらの素粒子同士はどのように相互作用するのか

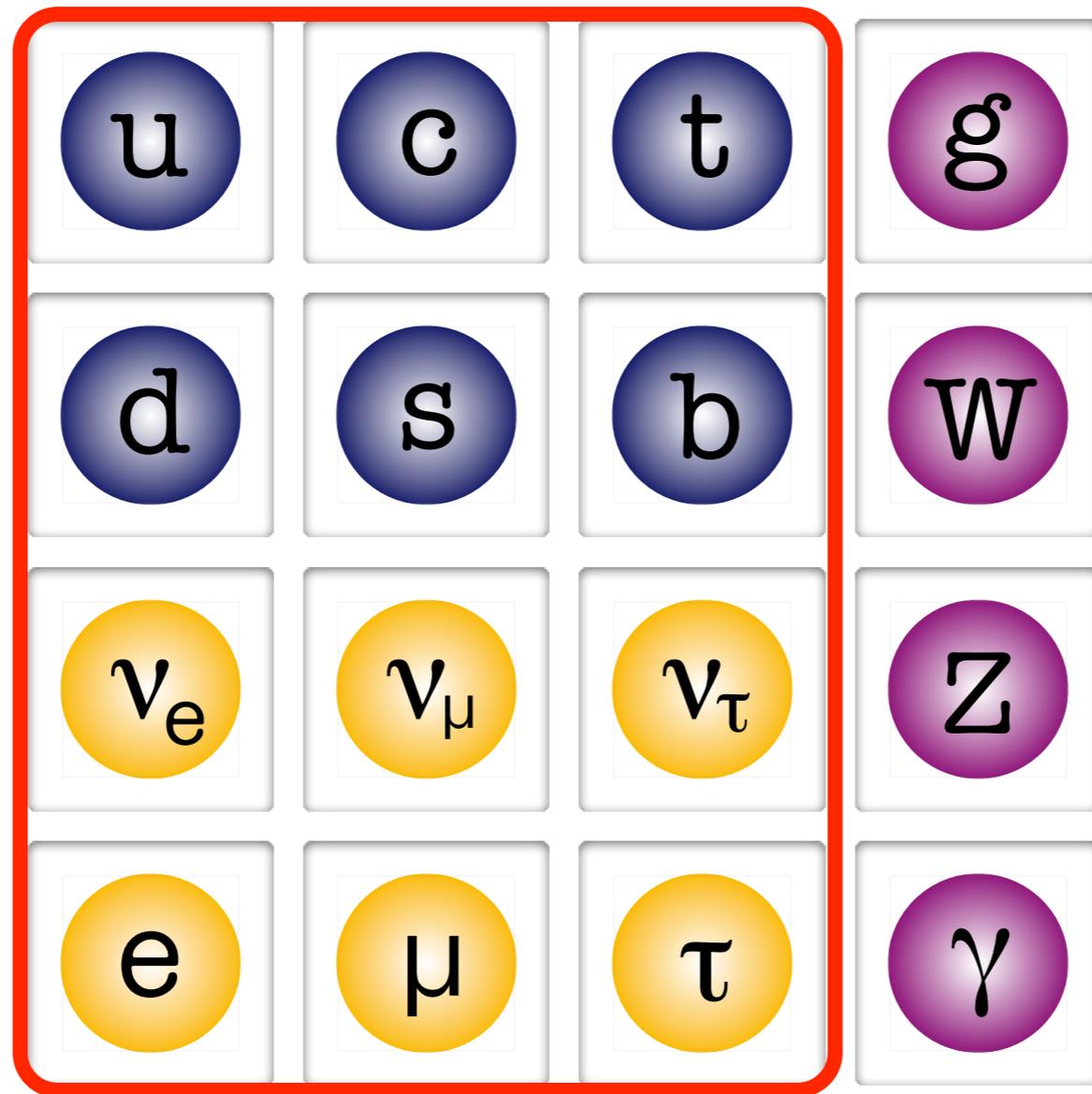
研究者が実際にやること：

- 上記3つに関して、仮説をたてる (**模型**をつくる)
- その仮説が世の中の物理現象 (実験結果) を正しく説明できるか、検証する。
- 未知の物理現象を予言する。

素粒子標準模型における素粒子



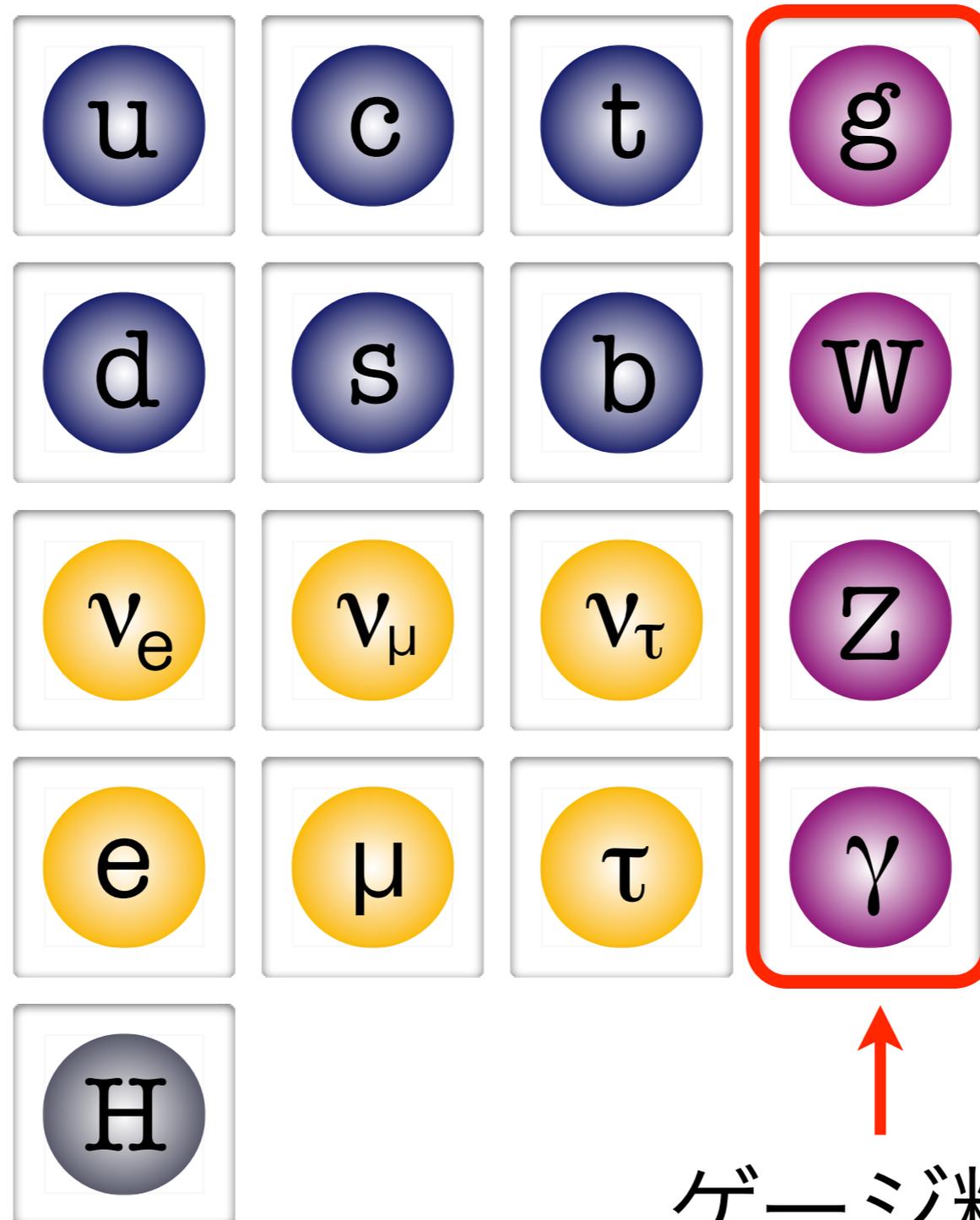
素粒子標準模型における素粒子



物質粒子

文字どおり、モノです

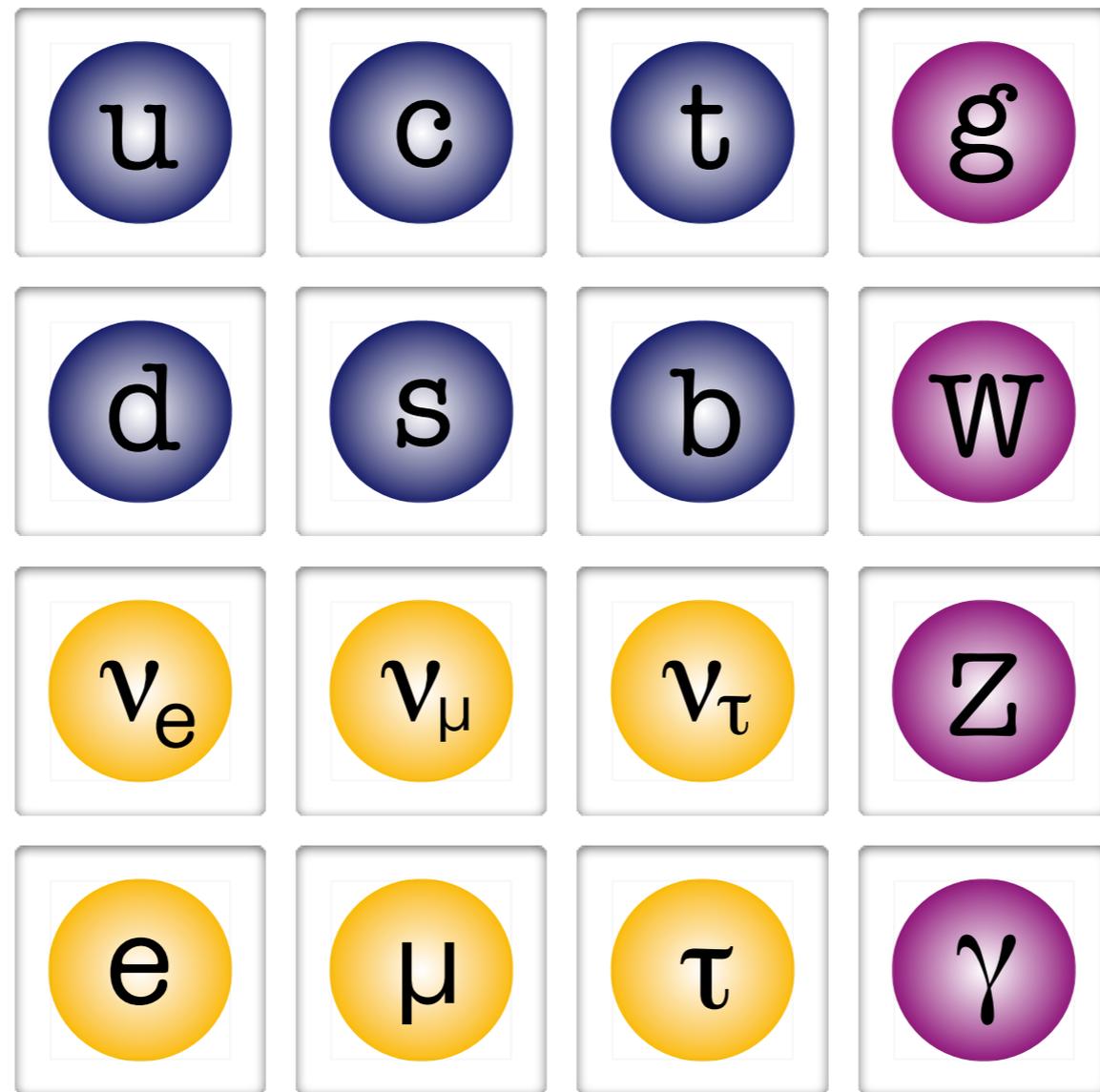
素粒子標準模型における素粒子



ゲージ粒子

力の源 (あとで説明します)

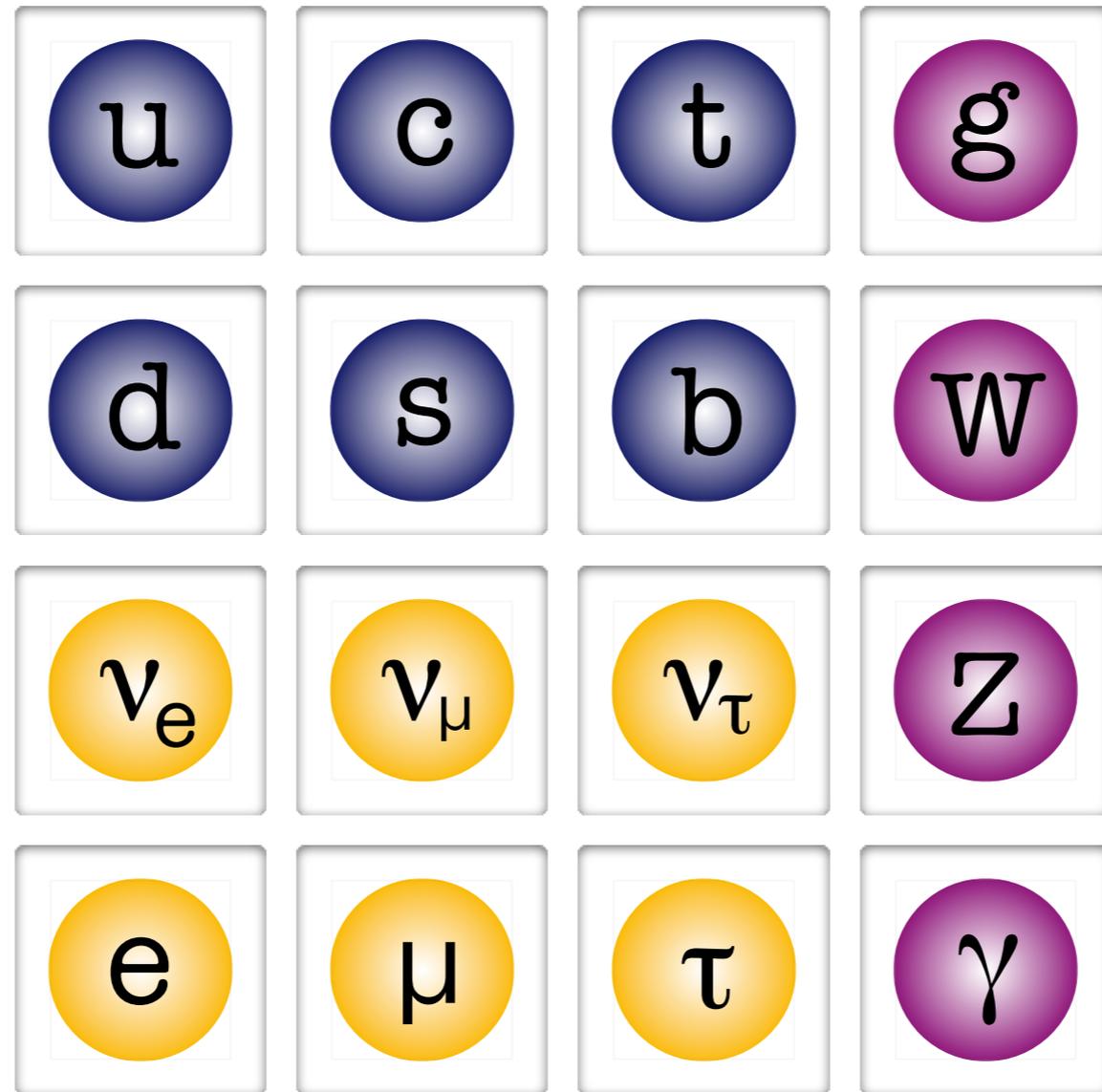
素粒子標準模型における素粒子



← **ヒッグス粒子！！**

質量の源 (あとで説明します)

素粒子標準模型における素粒子



ヒッグス粒子！！

この粒子の存在を予言して、
実験で実際にあることが、
確かめられたので、ノーベル賞

素粒子標準模型における素粒子

ちなみに、小林 - 益川はクォークがまだ3種類しか発見されていない頃に、6種類はあるはずだと予言しました。実際6種類ありました。
(2008年、ノーベル賞)

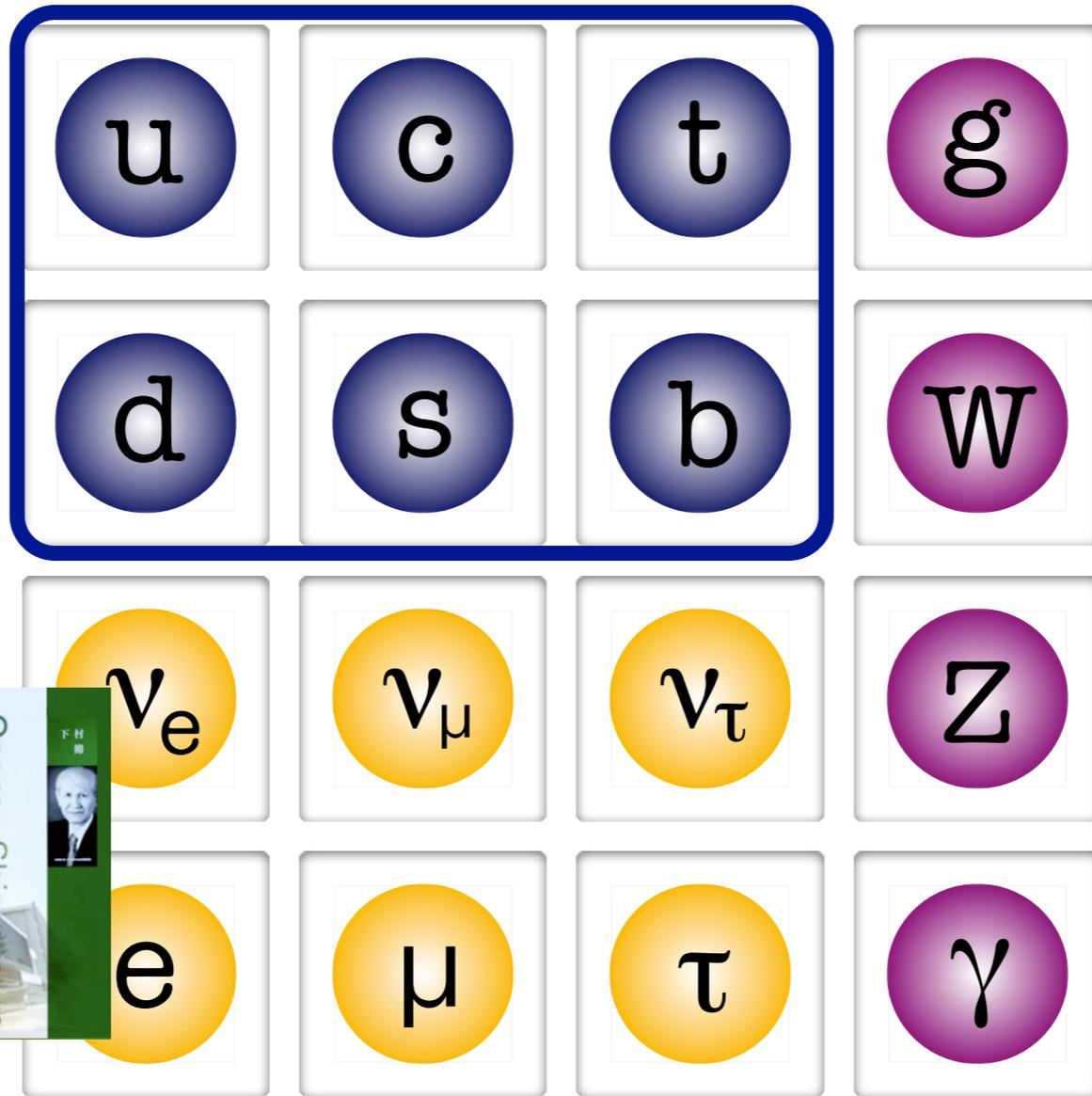


ヒッグス粒子！！

この粒子の存在を予言して、
実験で実際にあることが、
確かめられたので、ノーベル賞

素粒子標準模型における素粒子

ちなみに、小林 - 益川は
クォークがまだ3種類しか
発見されていない頃に、
6種類はあるはずだと
予言しました。実際6種類
ありました。
(2008年、ノーベル賞)



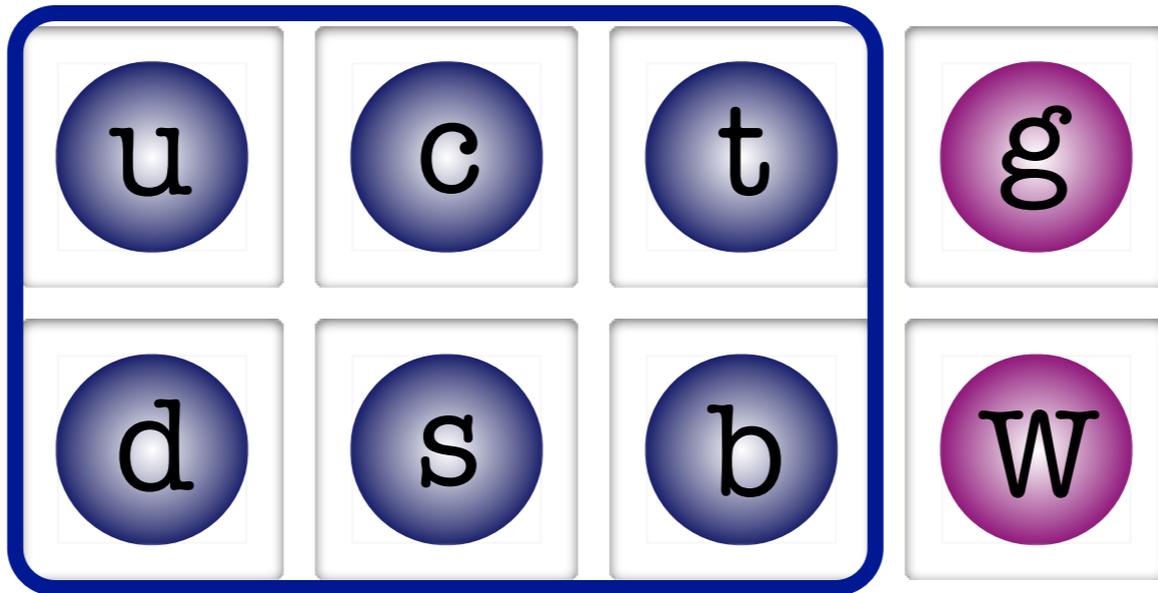
興味のある方は、2008
ノーベル賞展示室へ

ヒッグス粒子！！

この粒子の存在を予言して、
実験で実際にあることが、
確かめられたので、ノーベル賞

素粒子標準模型における素粒子

→
ちなみに、小林 - 益川はクォークがまだ3種類しか発見されていない頃に、6種類はあるはずだと予言しました。実際6種類ありました。
(2008年、ノーベル賞)



このように、未発見の粒子の存在を予言して、実際にみつかればノーベル賞がもらえます。みなさんも是非トライしましょう。



興味のある方は、2008
ノーベル賞展示室へ



← **ヒッグス粒子！！**

この粒子の存在を予言して、
実験で実際にあることが、
確かめられたので、ノーベル賞

質量とはなにか

質量とはなにか ☆☆

質量とはなにか ☆☆

質量が大きい：重い



質量が小さい：軽い



質量とはなにか ☆☆

質量が大きい：重い



質量が小さい：軽い



質量がない：究極の軽さ

質量とはなにか ☆☆

質量が大きい：重い



質量が小さい：軽い

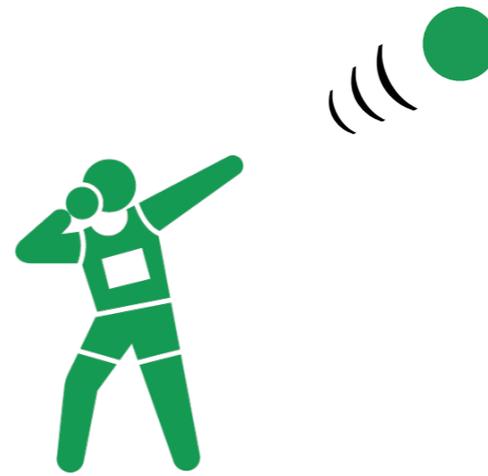


質量がない：究極の軽さ

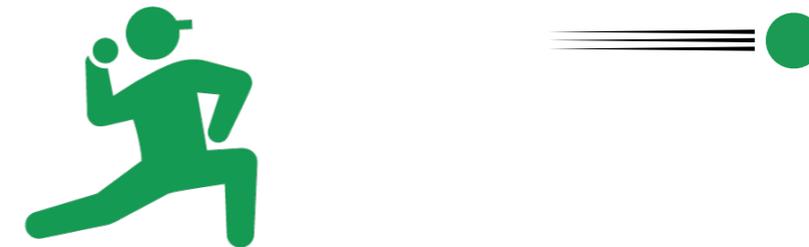
ちなみに身近なもので質量がないものがあります

質量とはなにか ☆☆

質量が大きい：重い



質量が小さい：軽い



質量がない：究極の軽さ

ちなみに身近なもので質量がないものがあります

光

究極の速さ（1秒間で地球7周半分の距離を進む）



質量とはなにか ☆☆

素粒子論の言葉ではどう表現されているか

質量とはなにか ★★

素粒子論の言葉ではどう表現されているか
すべては**ラグランジアン**に記述されている

質量とはなにか ★★

素粒子論の言葉ではどう表現されているか

すべては**ラグランジアン**に記述されている

ラグランジアン?????

質量とはなにか ★★

素粒子論の言葉ではどう表現されているか
すべてはラグランジアンに記述されている

ラグランジアン??????

じつはみなさん、すでに目にしています。

質量とはなにか ★★

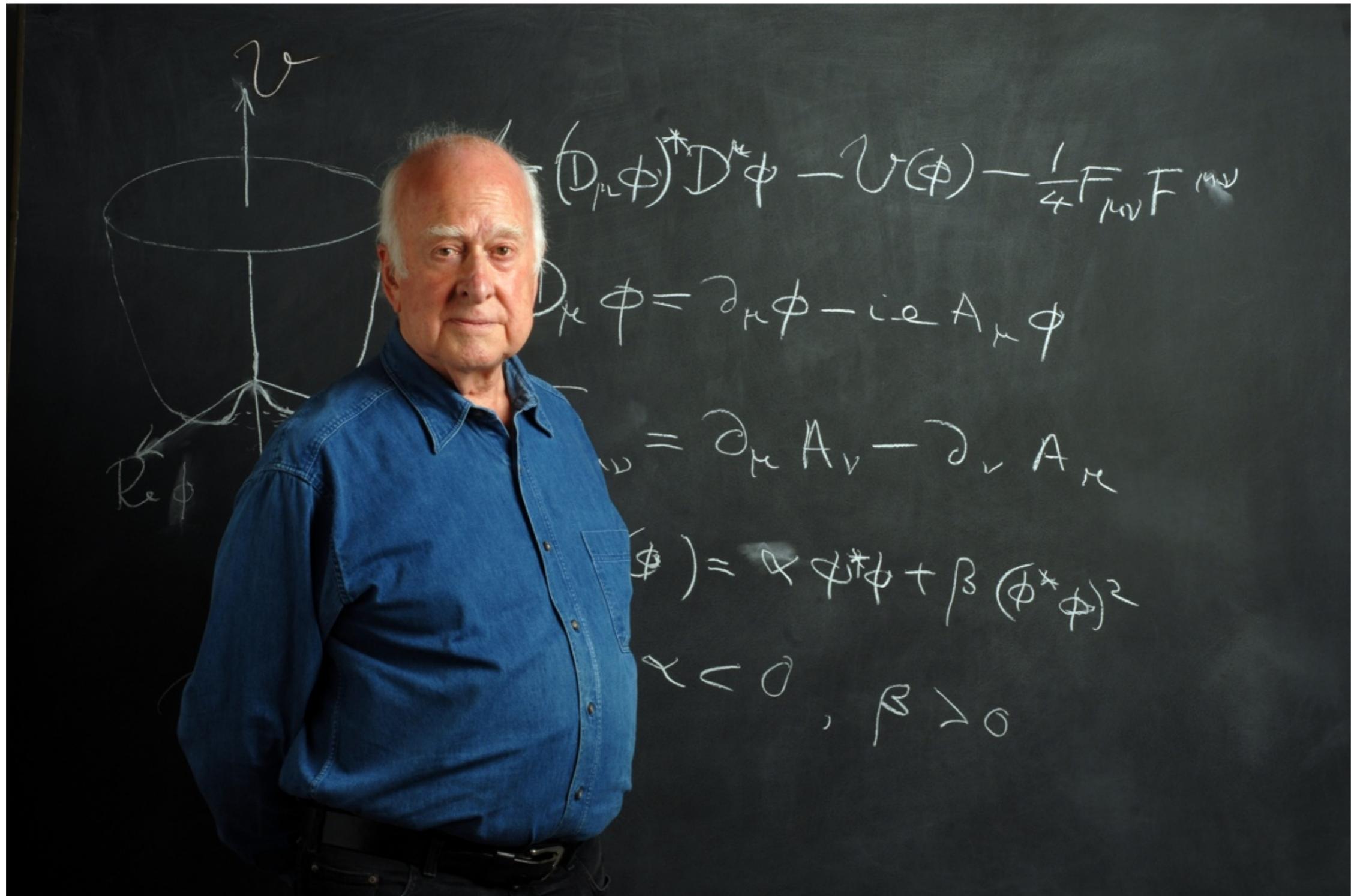
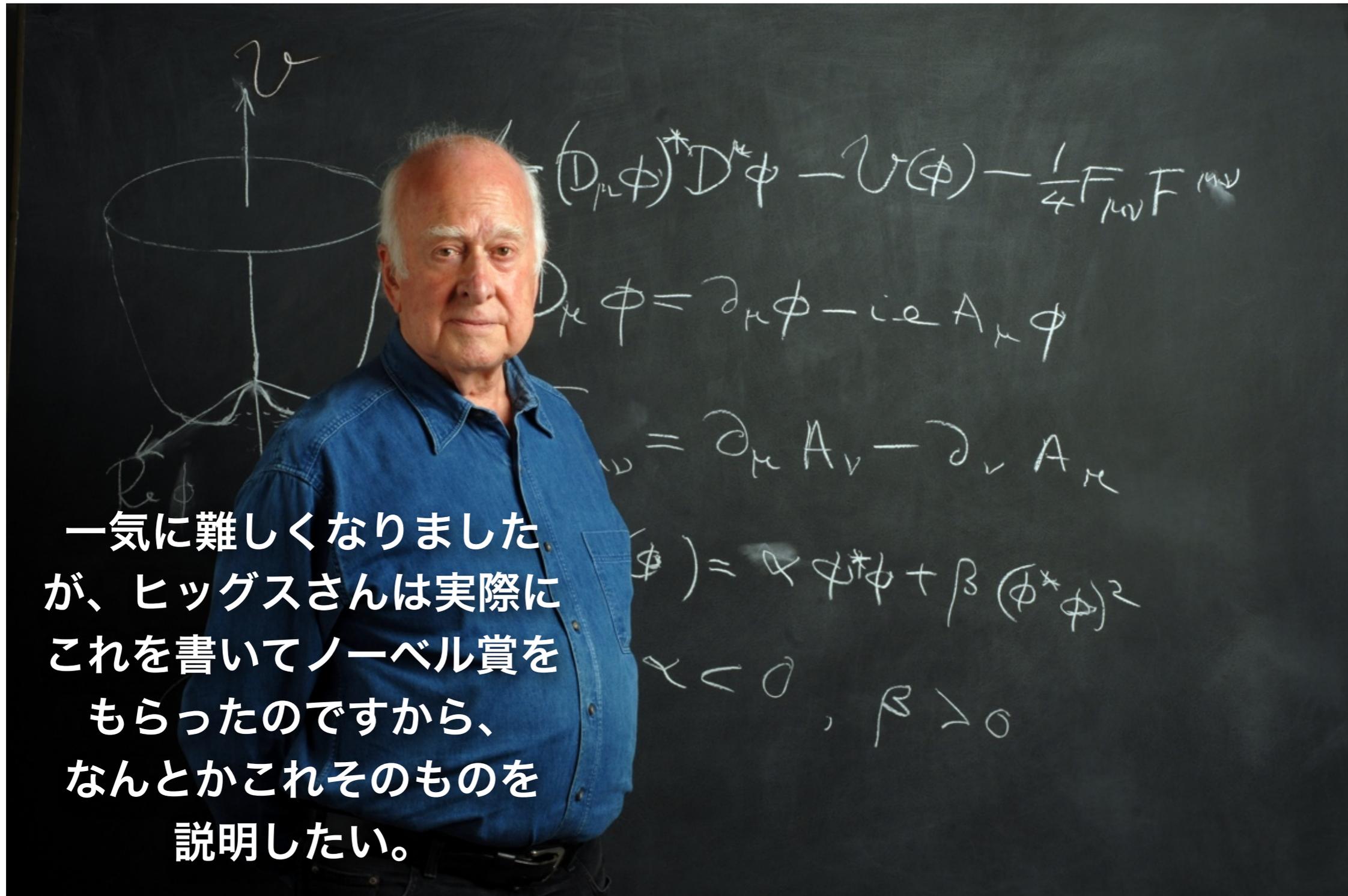


Photo: <http://www.ph.ed.ac.uk/higgs/galleries/peter-higgs-june-2009>

この黒板に書いてあるものが**ラグランジアン**です

質量とはなにか ★★★★★★★★



一気に難しくなりましたが、ヒッグスさんは実際にこれを書いてノーベル賞をもらったのですから、なんとかこれそのものを説明したい。

Photo: <http://www.ph.ed.ac.uk/higgs/galleries/peter-higgs-june-2009>

この黒板に書いてあるものが**ラグランジアン**です



ここから1分間
だけ我慢して
ください。

ラグランジアンには、存在する素粒子がそれぞれ
どのような性質をもつのか、また、素粒子同士が
どのように相互作用するのかが**数式**で書かれてい
ます。 **ラグランジアンがすべてを決めるのです。**

モデルを作る = どのような素粒子が存在するか
仮定し、その素粒子に関する
ラグランジアンを書き下すこと



もう少し
だけ我慢して
ください。

模型を作ったあと我々研究者は何をするかというと、
その準備した素粒子とラグランジアンを用いて、



もう少し
だけ我慢して
ください。

模型を作ったあと我々研究者は何をするかというと、
その準備した素粒子とラグランジアンを用いて、
経路積分と呼ばれる計算をします。



もう少し
だけ我慢して
ください。

模型を作ったあと我々研究者は何をするかというと、
その準備した素粒子とラグランジアンを用いて、
経路積分と呼ばれる計算をします。

この計算はとても難しいため、**摂動論**と呼ばれる
近似を用いて計算をおこなったり、

もう少し
だけ我慢して
ください。



模型を作ったあと我々研究者は何をするかというと、
その準備した素粒子とラグランジアンを用いて、
経路積分と呼ばれる計算をします。

この計算はとても難しいため、**摂動論**と呼ばれる
近似を用いて計算をおこなったり、
スーパーコンピューターを用いて力づくで
計算したりします。

もう少し
だけ我慢して
ください。



模型を作ったあと我々研究者は何をするかというと、
その準備した素粒子とラグランジアンを用いて、
経路積分と呼ばれる計算をします。

この計算はとても難しいため、**摂動論**と呼ばれる
近似を用いて計算をおこなったり、
スーパーコンピューターを用いて力づくで
計算したりします。

こういった計算により、この模型が真実だった場合に
この世の中で起こる物理現象を予言することができます。



お疲れ様でした

ただ、これらの計算は大学～大学院レベルの講義を数年かけて受けてやっとできるようになるような難しい計算ですので、、、



お疲れ様でした

ただ、これらの計算は大学～大学院レベルの講義を数年かけて受けてやっとできるようになるような難しい計算ですので、、、

今日はちょっとやんわりとした説明をします。



お疲れ様でした

ただ、これらの計算は大学～大学院レベルの講義を数年かけて受けてやっとできるようになるような難しい計算ですので、、

今日はちょっとやんわりとした説明をします。

(今わざわざ難しいことを言ったのは、実際は今から言うようなやんわりしたことをしているわけではなく、きちんとした計算をしているのですよ、と言っておきたかったからです。)

(皆さん、自分がひとつの素粒子になったと思って想像してください)

世の中に存在するすべての素粒子は、様々な方向に光速で等速直線運動しています。

ただし、定期的に**ラグランジアン**から命令が降ってきて、その命令には絶対に従わなければいけません。

具体的にどのような命令がどのような割合で出されるかは**ラグランジアンの中**を見てみない限り分かりませんが、命令には大きくわけて3種類のものがあることはわかっています。

1. 直進の命令 (運動項)

何事もなかったようにそのまま進む

2. 一時停止の命令 (質量項)

一瞬止まったあとに、同じ速度でまた進む

3. 相互作用の命令 (相互作用項)

近くに居る素粒子を吸収したり、自分が吸収されたり、他の複数の素粒子に化けると無理なことを言われたり、いろんな命令があります

質量とはなにか ☆☆

質量が大きい：重い



質量が小さい：軽い



質量がない：究極の軽さ

ちなみに身近なもので質量がないものがあります

光

究極の速さ（1秒間で地球7周半分の距離を進む）



質量とはなにか ☆☆

質量が大きい：重い (一時停止の命令の頻度が高い)

質量が小さい：軽い (一時停止の命令の頻度が低い)

質量がない：究極の軽さ (一時停止の命令がまったくでない)

質量とはなにか ☆☆

質量が大きい：重い (一時停止の命令の頻度が高い)



質量が小さい：軽い (一時停止の命令の頻度が低い)



質量がない：究極の軽さ (一時停止の命令がまったくでない)



質量とはなにか ☆☆

質量が大きい：重い (一時停止の命令の頻度が高い)



質量が小さい：軽い (一時停止の命令の頻度が低い)

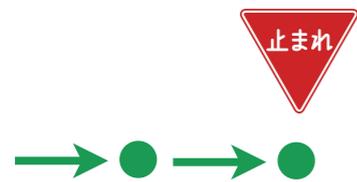


質量がない：究極の軽さ (一時停止の命令がまったくでない)

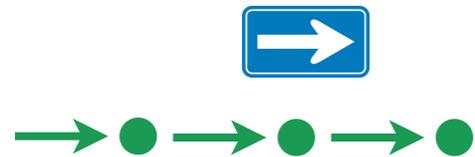


質量とはなにか ☆☆

質量が大きい：重い (一時停止の命令の頻度が高い)



質量が小さい：軽い (一時停止の命令の頻度が低い)



質量がない：究極の軽さ (一時停止の命令がまったくでない)

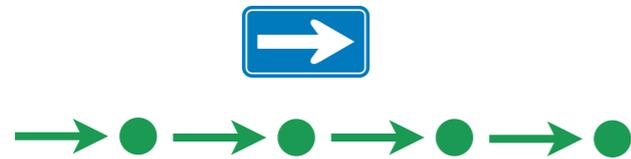


質量とはなにか ☆☆

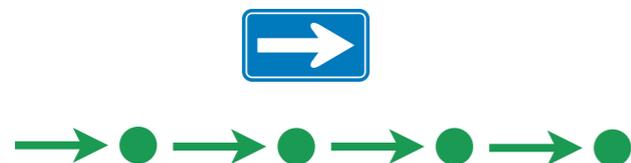
質量が大きい：重い (一時停止の命令の頻度が高い)



質量が小さい：軽い (一時停止の命令の頻度が低い)



質量がない：究極の軽さ (一時停止の命令がまったくでない)

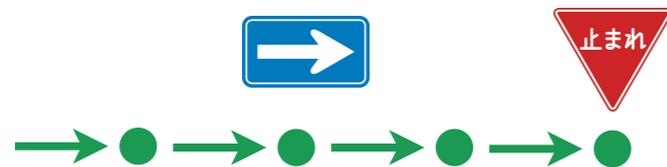


質量とはなにか ☆☆

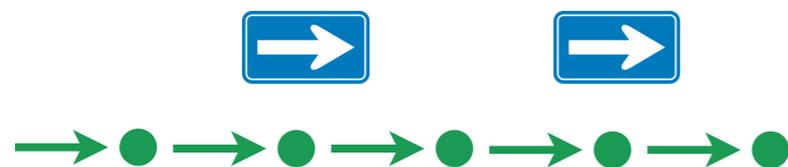
質量が大きい：重い (一時停止の命令の頻度が高い)



質量が小さい：軽い (一時停止の命令の頻度が低い)

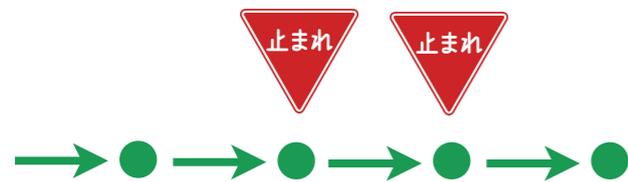


質量がない：究極の軽さ (一時停止の命令がまったくでない)

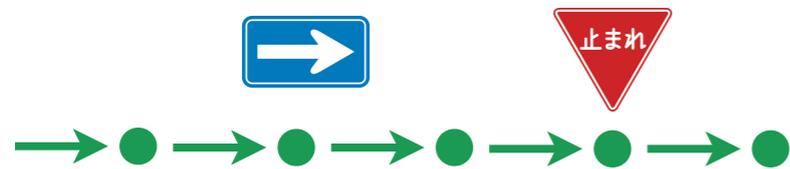


質量とはなにか ☆☆

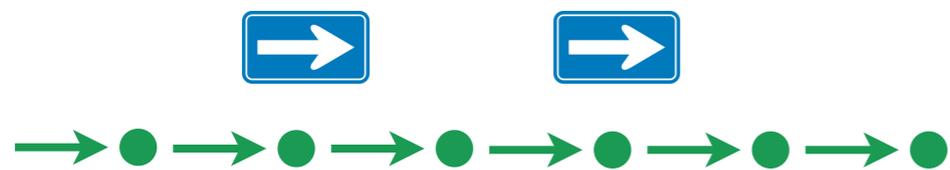
質量が大きい：重い (一時停止の命令の頻度が高い)



質量が小さい：軽い (一時停止の命令の頻度が低い)

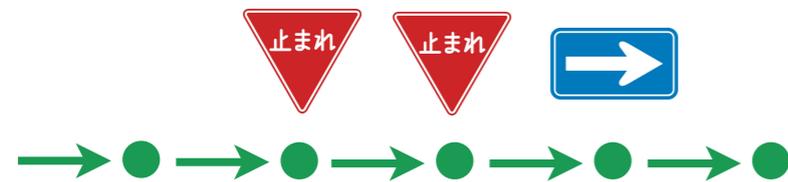


質量がない：究極の軽さ (一時停止の命令がまったくでない)

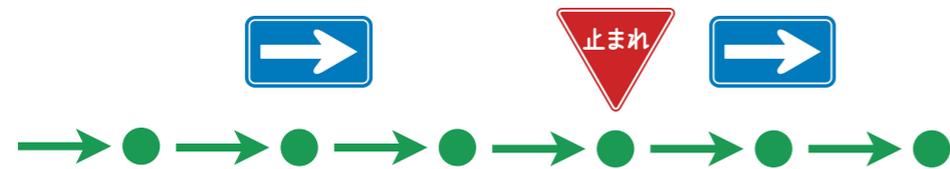


質量とはなにか ☆☆

質量が大きい：重い (一時停止の命令の頻度が高い)



質量が小さい：軽い (一時停止の命令の頻度が低い)

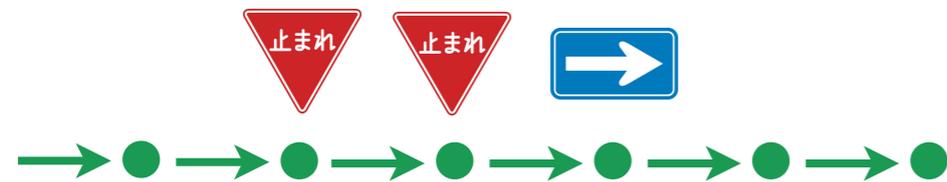


質量がない：究極の軽さ (一時停止の命令がまったくでない)

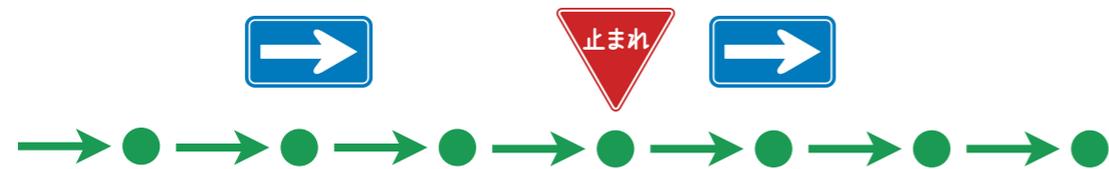


質量とはなにか ☆☆

質量が大きい：重い (一時停止の命令の頻度が高い)



質量が小さい：軽い (一時停止の命令の頻度が低い)

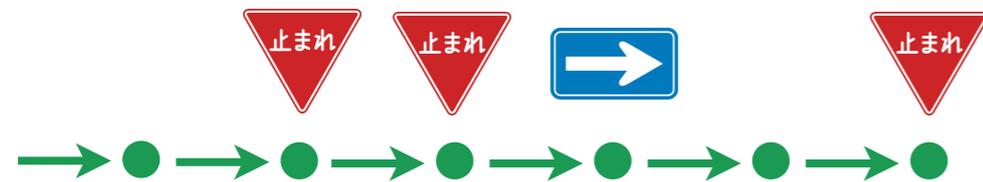


質量がない：究極の軽さ (一時停止の命令がまったくでない)

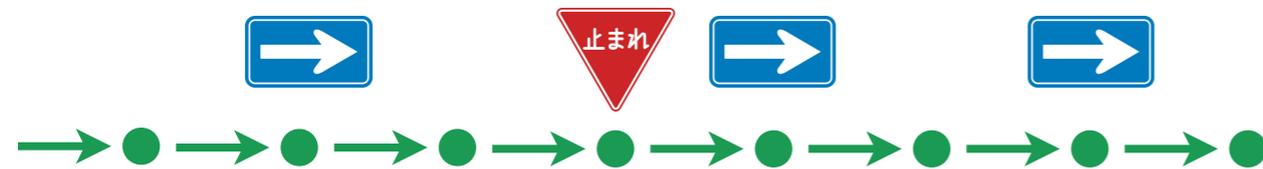


質量とはなにか ☆☆

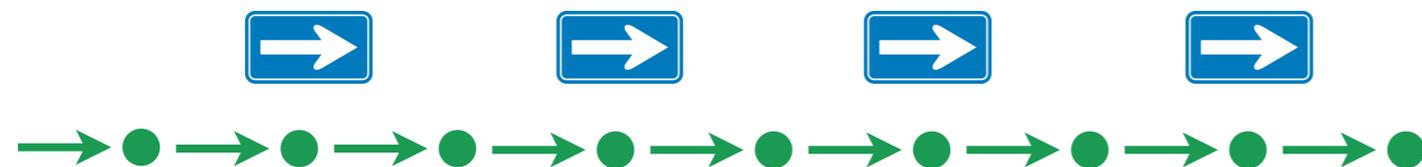
質量が大きい：重い (一時停止の命令の頻度が高い)



質量が小さい：軽い (一時停止の命令の頻度が低い)

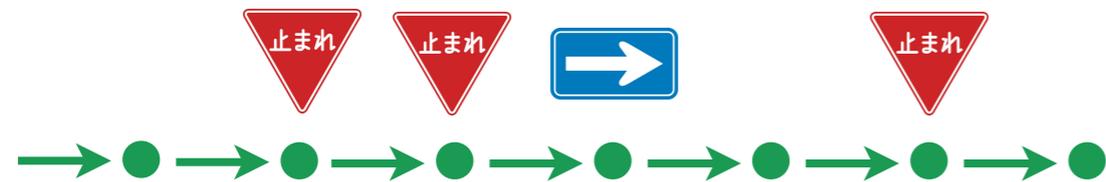


質量がない：究極の軽さ (一時停止の命令がまったくでない)

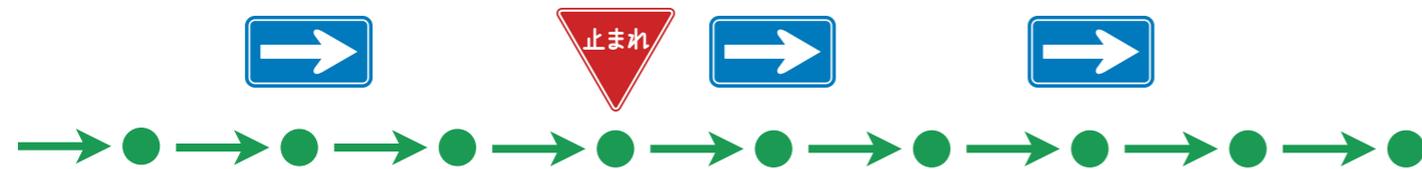


質量とはなにか ☆☆

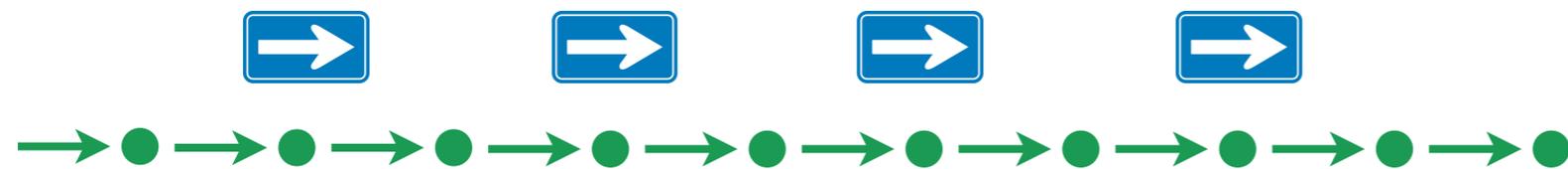
質量が大きい：重い (一時停止の命令の頻度が高い)



質量が小さい：軽い (一時停止の命令の頻度が低い)

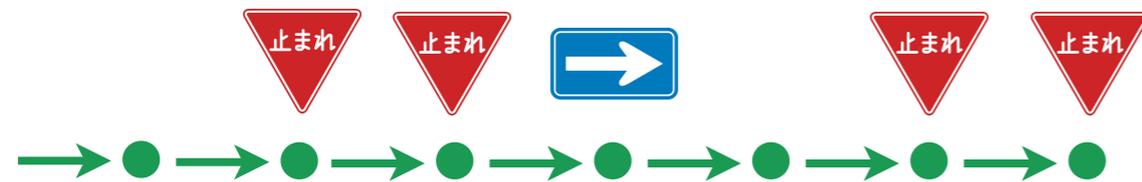


質量がない：究極の軽さ (一時停止の命令がまったくでない)

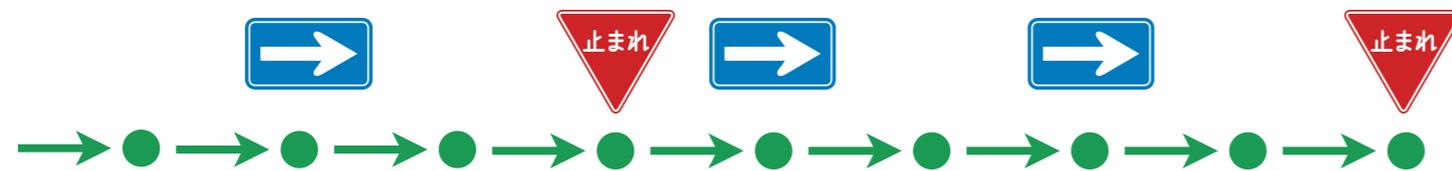


質量とはなにか ☆☆

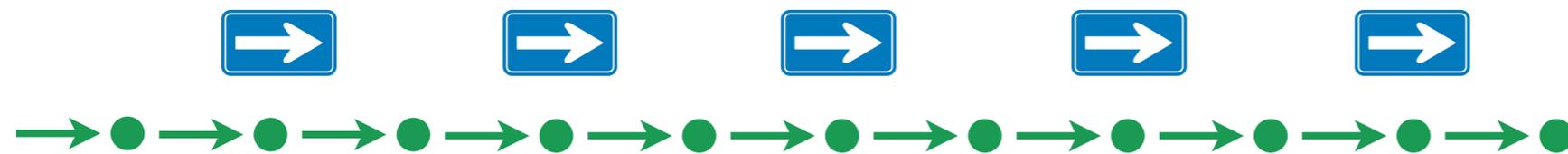
質量が大きい：重い (一時停止の命令の頻度が高い)



質量が小さい：軽い (一時停止の命令の頻度が低い)

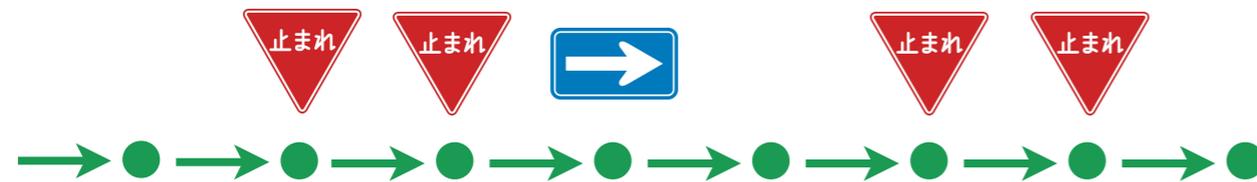


質量がない：究極の軽さ (一時停止の命令がまったくでない)

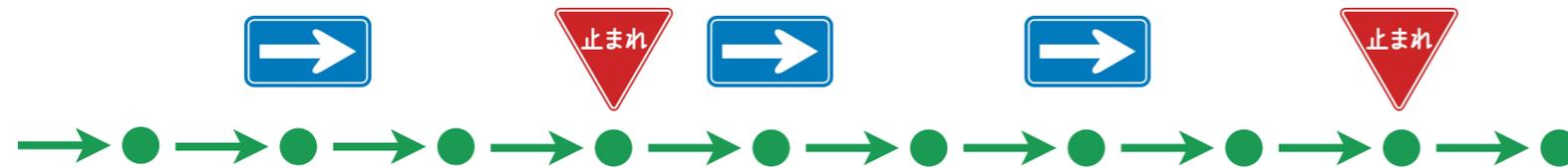


質量とはなにか ☆☆

質量が大きい：重い (一時停止の命令の頻度が高い)



質量が小さい：軽い (一時停止の命令の頻度が低い)

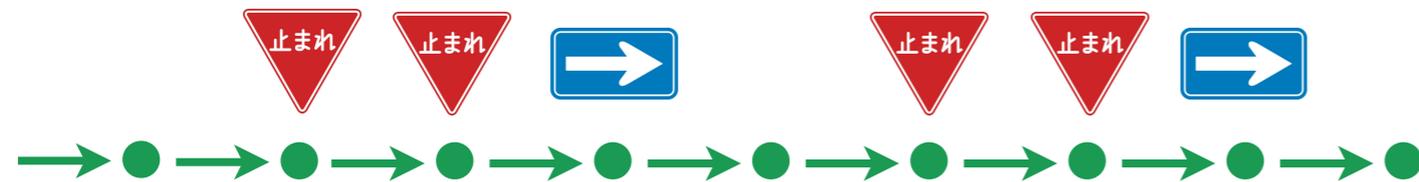


質量がない：究極の軽さ (一時停止の命令がまったくでない)

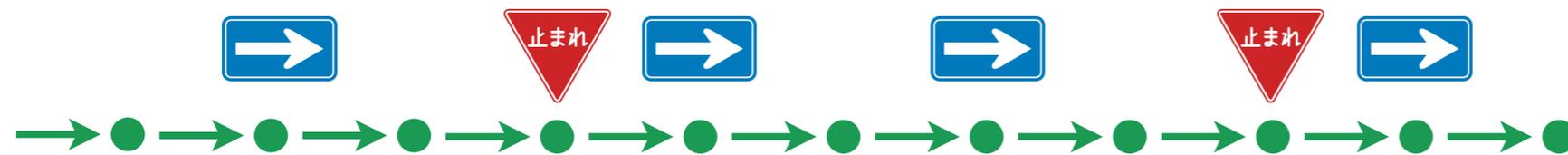


質量とはなにか ☆☆

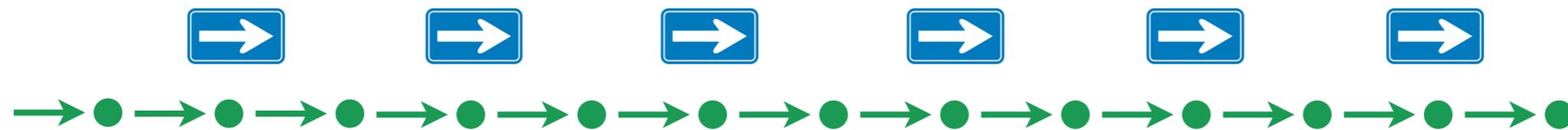
質量が大きい：重い (一時停止の命令の頻度が高い)



質量が小さい：軽い (一時停止の命令の頻度が低い)

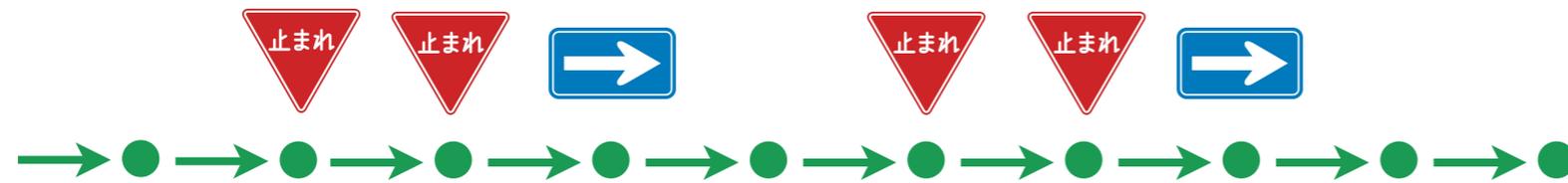


質量がない：究極の軽さ (一時停止の命令がまったくでない)

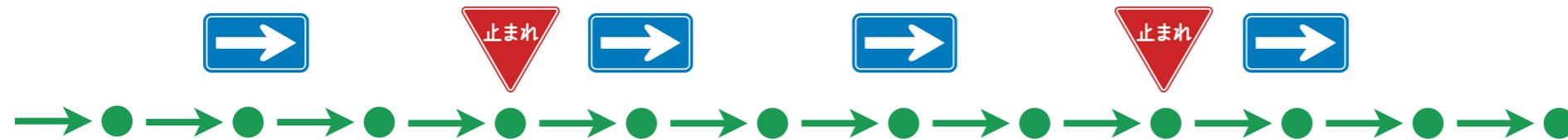


質量とはなにか ☆☆

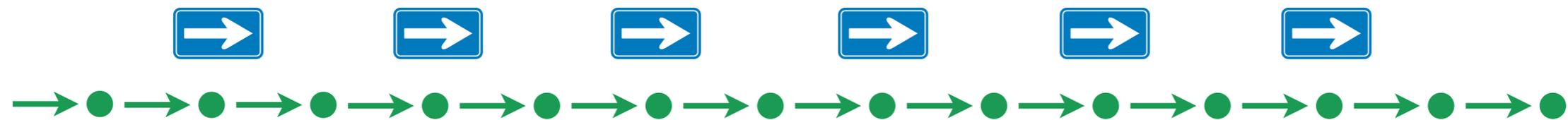
質量が大きい：重い (一時停止の命令の頻度が高い)



質量が小さい：軽い (一時停止の命令の頻度が低い)

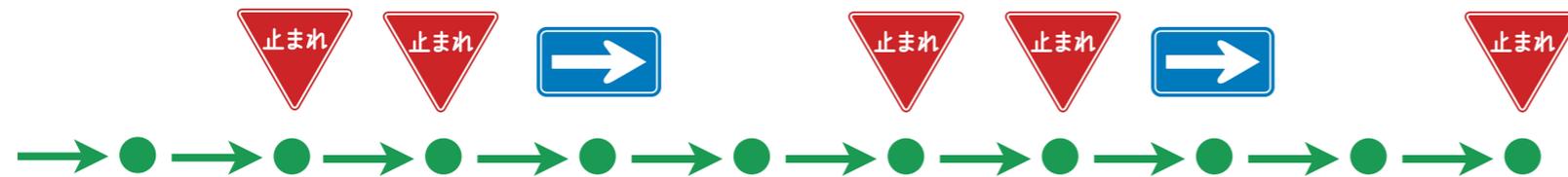


質量がない：究極の軽さ (一時停止の命令がまったくでない)

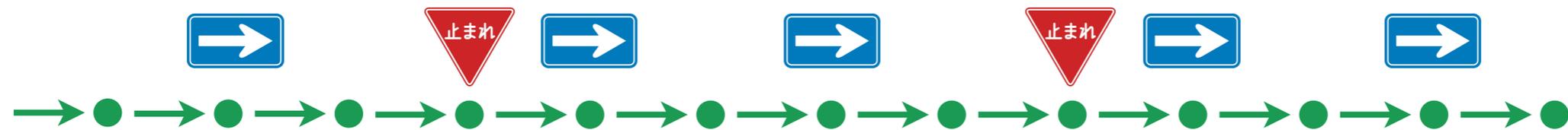


質量とはなにか ☆☆

質量が大きい：重い (一時停止の命令の頻度が高い)



質量が小さい：軽い (一時停止の命令の頻度が低い)

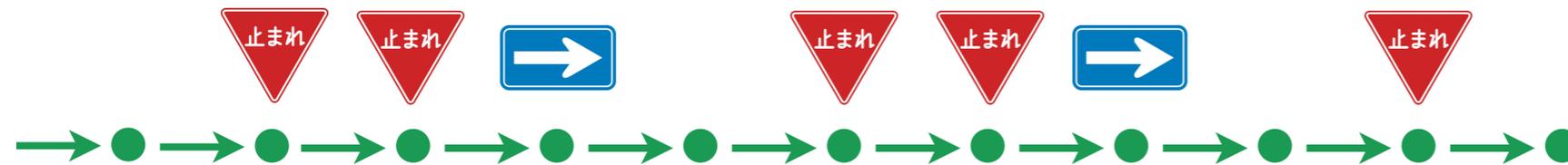


質量がない：究極の軽さ (一時停止の命令がまったくでない)

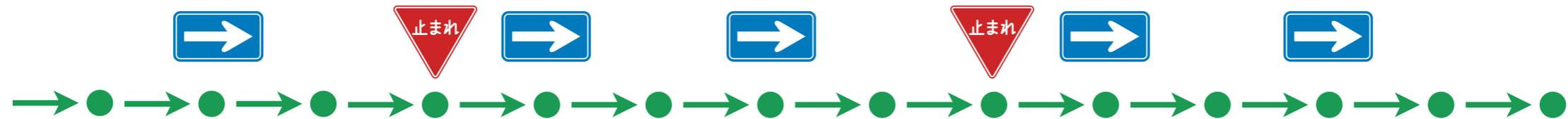


質量とはなにか ☆☆

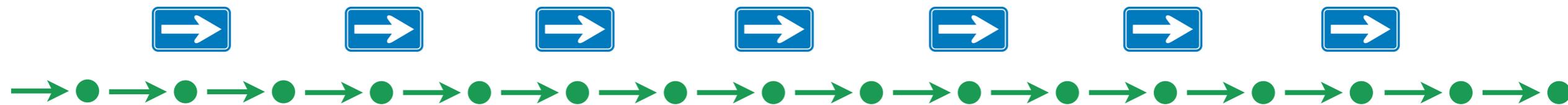
質量が大きい：重い (一時停止の命令の頻度が高い)



質量が小さい：軽い (一時停止の命令の頻度が低い)



質量がない：究極の軽さ (一時停止の命令がまったくでない)



質量とはなにか ☆☆

これを、ある種の平均化を
して見てやって下さい

質量が大きい：重い

ゆっくりまっすぐ飛ぶ



質量が小さい：軽い

速くまっすぐ飛ぶ



質量がない：究極の軽さ

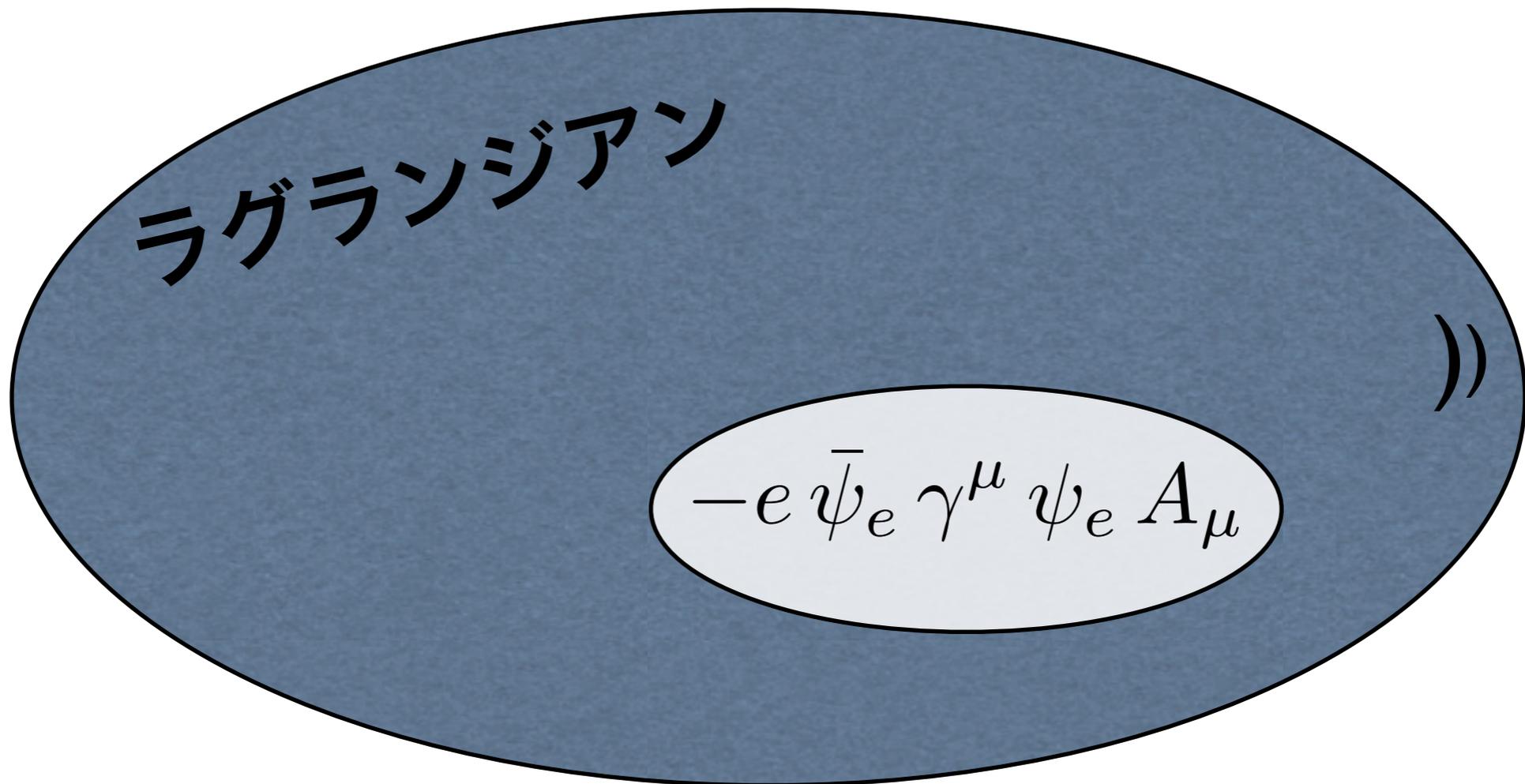
光速でまっすぐ飛ぶ



さて、重い素粒子、軽い素粒子、質量のない素粒子のそれぞれの運動の説明は聞いたけど、、、素粒子同士の相互作用は素粒子論ではどのように記述されているのだろう。

そういえばさっき、**ラグランジアンからの命令**のなかに**相互作用の命令**というのがあったぞ！

今日は特別に、ラグランジアンの中身を見せちゃいます



たとえば、こんな命令がありました。

$$-e \bar{\psi}_e \gamma^\mu \psi_e A_\mu$$

たとえば、こんな命令がありました。

$$-e \bar{\psi}_e \gamma^\mu \psi_e A_\mu$$

あまり気にしないでください

たとえば、こんな命令がありました。

$$-e \bar{\psi}_e \gamma^\mu \psi_e A_\mu$$



これはただの数値で、この数値が
大きいほどこの命令が出る頻度が高い

たとえば、こんな命令がありました。

$$-e \bar{\psi}_e \gamma^\mu \psi_e A_\mu$$

あなたが電子ならこの場で消滅しなさいという意味

たとえば、こんな命令がありました。

$$-e \bar{\psi}_e \gamma^\mu \psi_e A_\mu$$

あなたが電子ならこの場で消滅しなさいという意味

そしてすぐに復活しなさいという意味

たとえば、こんな命令がありました。

$$-e \bar{\psi}_e \gamma^\mu \psi_e A_\mu$$

あなたが電子ならこの場で消滅しなさいという意味

そしてすぐに復活しなさいという意味

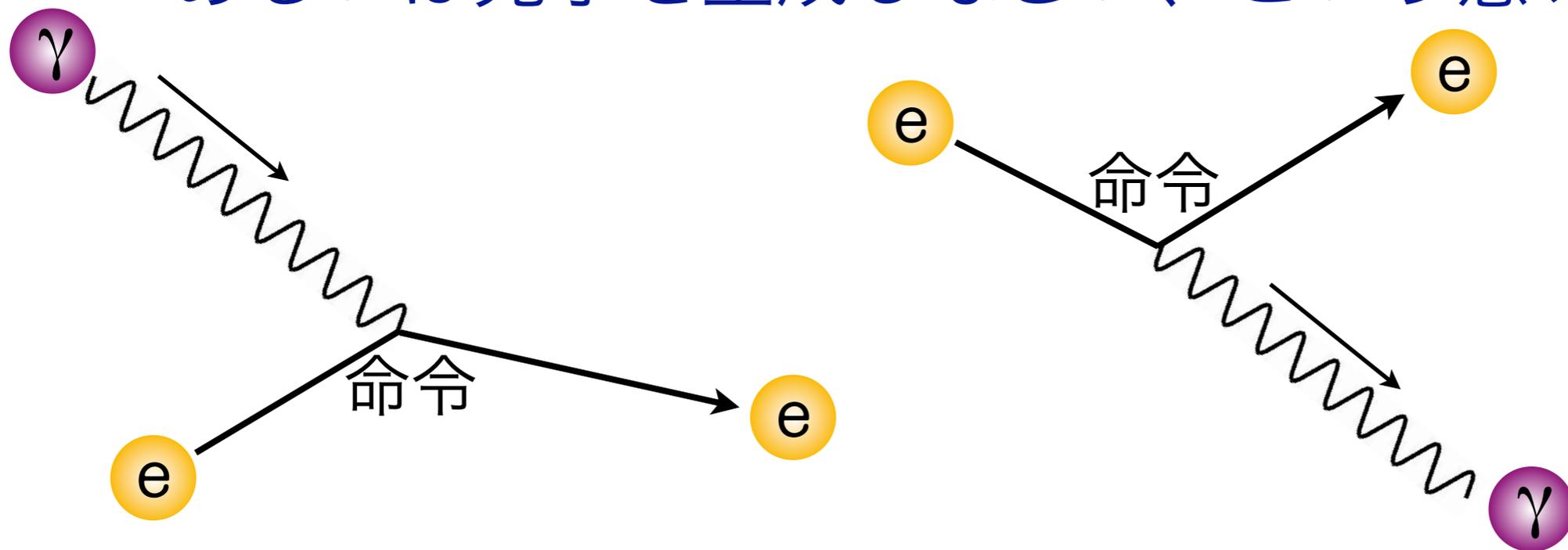
近くに光子がいればそいつを消滅させなさい、
あるいは光子を生成しなさい、という意味

たとえば、こんな命令がありました。

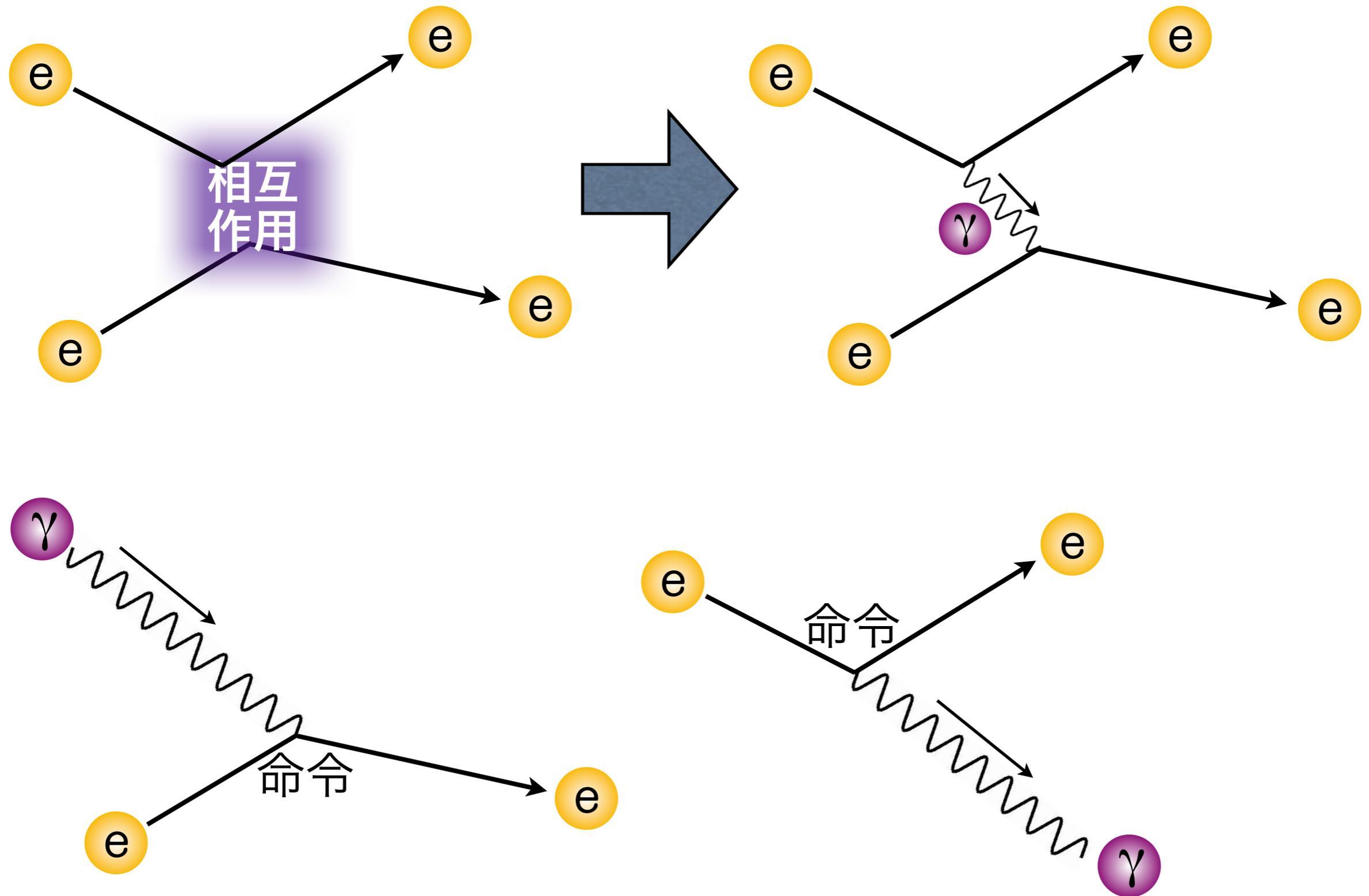
$$-e \bar{\psi}_e \gamma^\mu \psi_e A_\mu$$

あなたが電子ならこの場で消滅しなさいという意味
そしてすぐに復活しなさいと言う意味

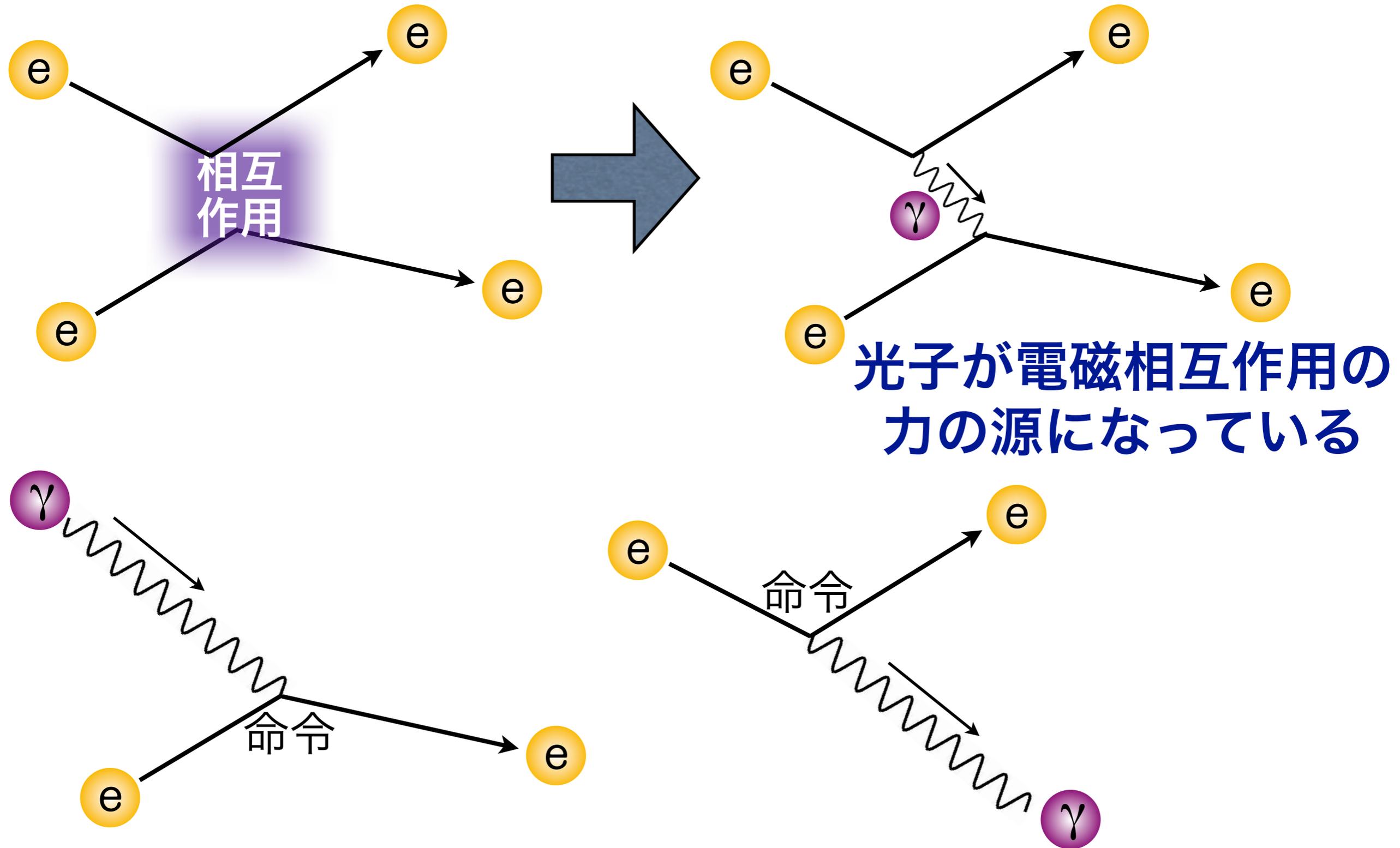
近くに光子がいればそいつを消滅させなさい、
あるいは光子を生成しなさい、という意味



電子と電子の散乱はこれで説明できる



電子と電子の散乱はこれで説明できる



電子と電子の散乱はこれで説明できる

しかし、、、世の中にはいろんな素粒子が
いるんな相互作用をしているのだけど、
ラグランジアンを作った人はどうやってどの
相互作用が存在するかとか、それらの命令を出す
割合とかを決めたのだらうか。

電子と電子の散乱はこれで説明できる

しかし、、、世の中にはいろんな素粒子が
いるんな相互作用をしているのだけど、
ラグランジアンを作った人はどうやってどの
相互作用が存在するかとか、それらの命令を出す
割合とかを決めたのだろうか。

ここでゲージ対称性が登場する

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

素粒子が持つ**内部空間の回転対称性**みたいなもの

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

素粒子が持つ**内部空間の回転対称性**みたいなもの

内部空間????

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

素粒子が持つ**内部空間**の**回転対称性**みたいなもの

内部空間????



ドラえもんの
4次元ポケット
みたいなもの？

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

素粒子が持つ**内部空間**の**回転対称性**みたいなもの

内部空間?????



© 藤子プロ・小学館

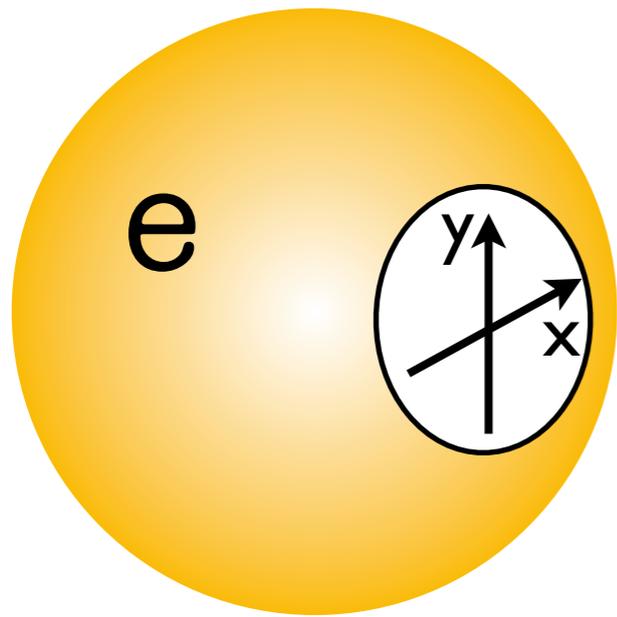
ドラえもんの
4次元ポケット
みたいなもの？

当たらずといえども
遠からず

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

素粒子が持つ**内部空間**の**回転対称性**みたいなもの

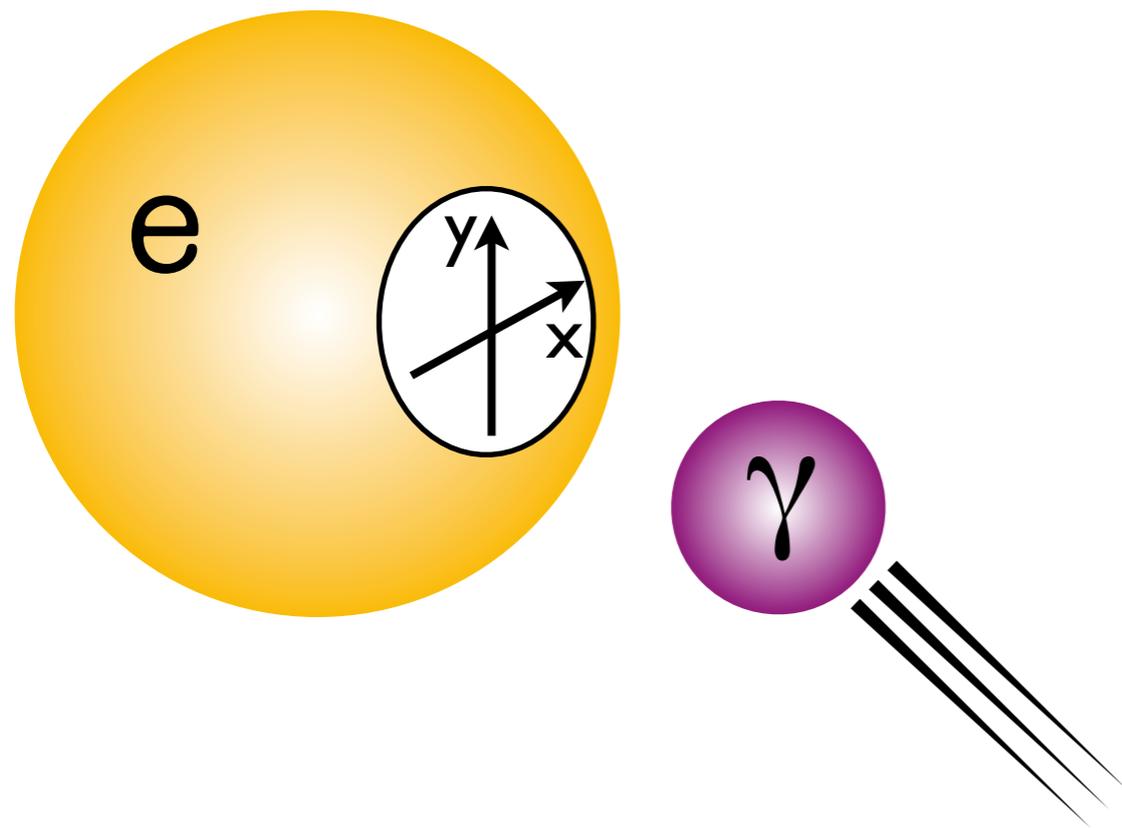
内部空間 ? ? ? ?



ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

素粒子が持つ**内部空間**の**回転対称性**みたいなもの

内部空間????

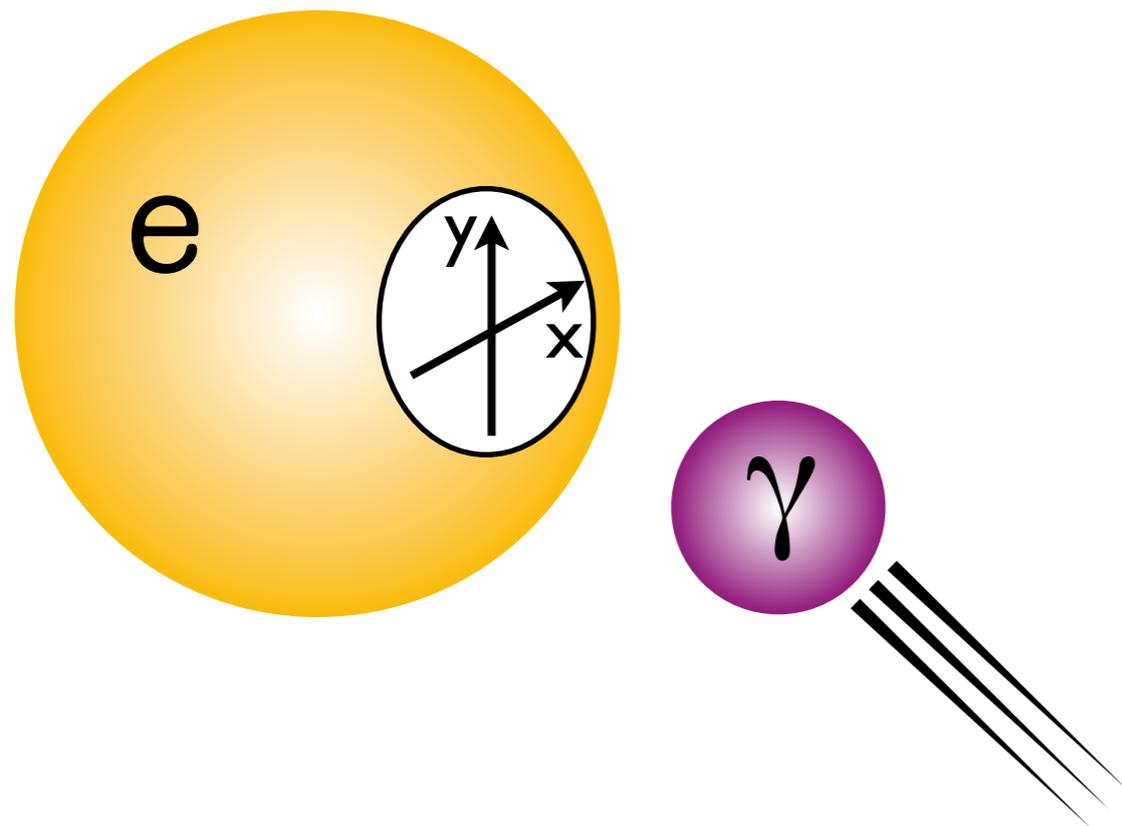


光子は電子のこの内部空間を
見つけると飛び込んできます

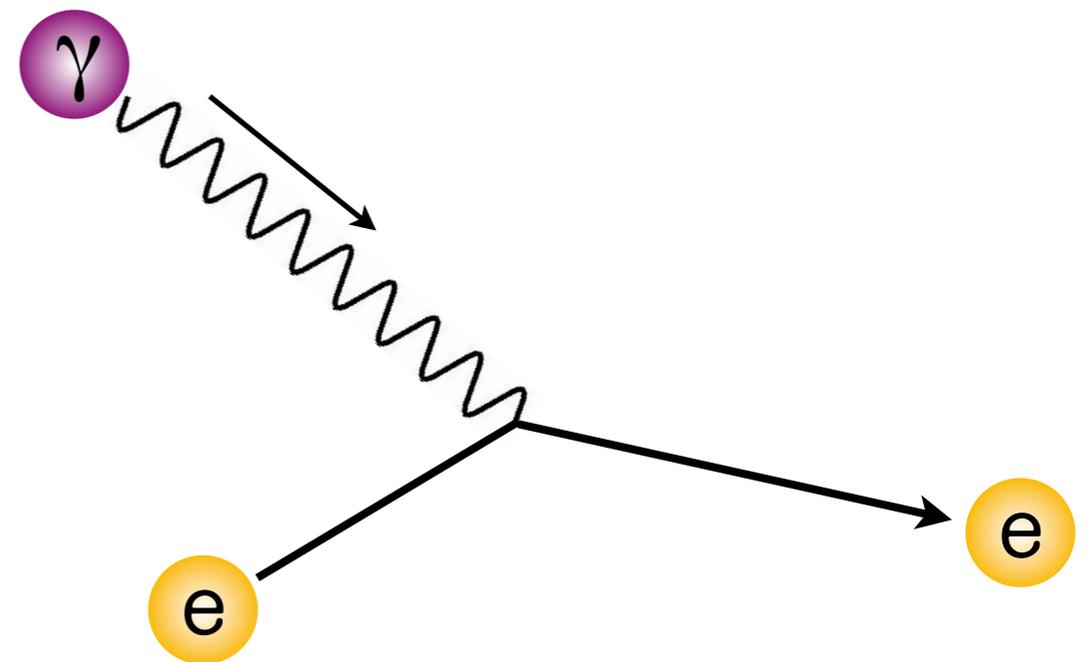
ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

素粒子が持つ内部空間の回転対称性みたいなもの

内部空間?????



光子は電子のこの内部空間を見つけると飛び込んできます

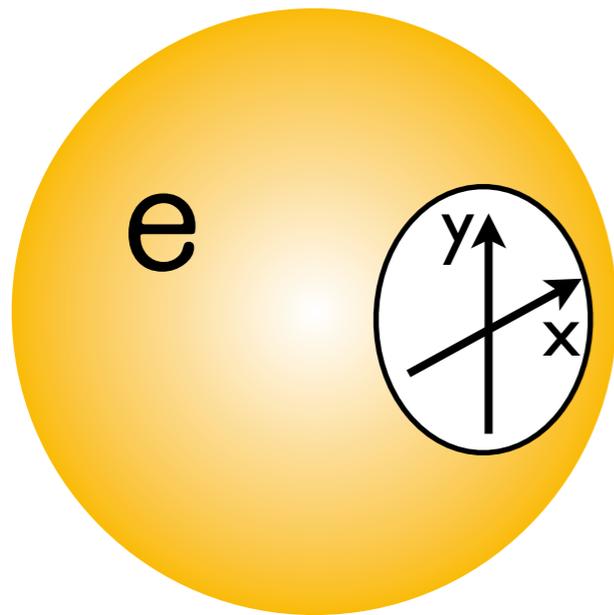


さっき言っていた相互作用はこのような仕組みでできています (これちょっとビミョーな説明なんですが、許してください。)

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

素粒子が持つ内部空間の回転対称性みたいなもの

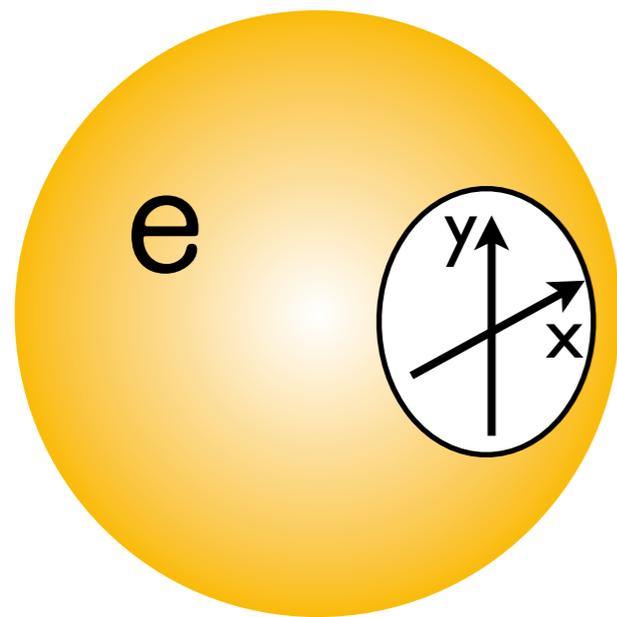
内部空間???? 回転対称性??????



ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

素粒子が持つ内部空間の回転対称性みたいなもの

内部空間???? 回転対称性?????

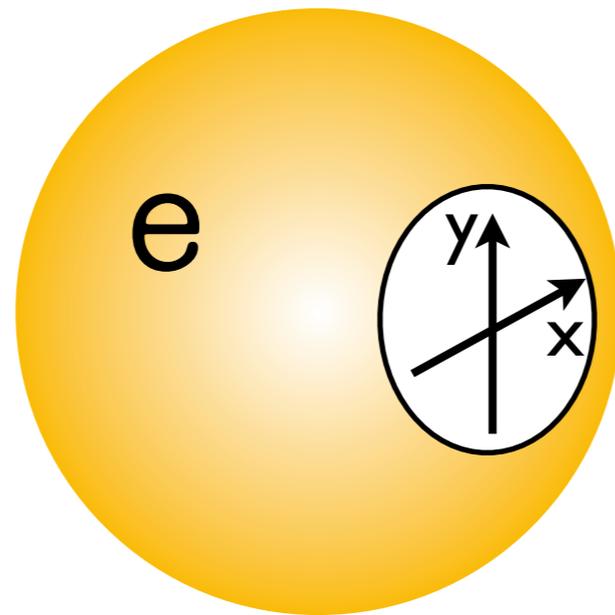


電子がこの位置から、、、

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

素粒子が持つ**内部空間の回転対称性**みたいなもの

内部空間????? **回転対称性**??????

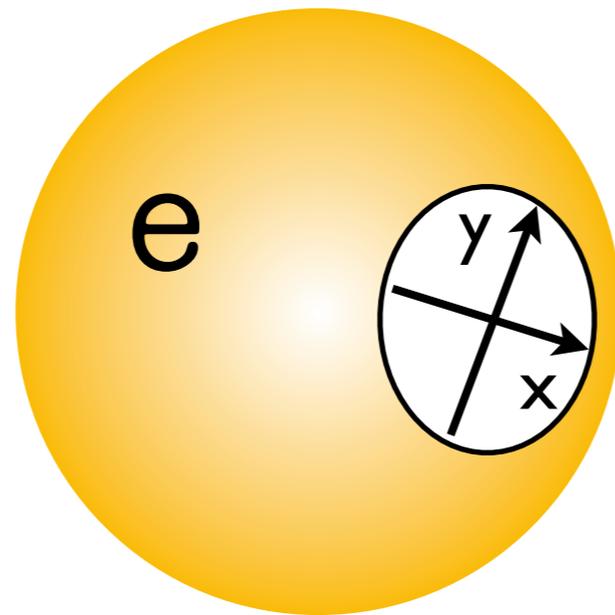


電子がこの位置から、、、この位置に移動した時

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

素粒子が持つ**内部空間の回転対称性**みたいなもの

内部空間???? **回転対称性**????

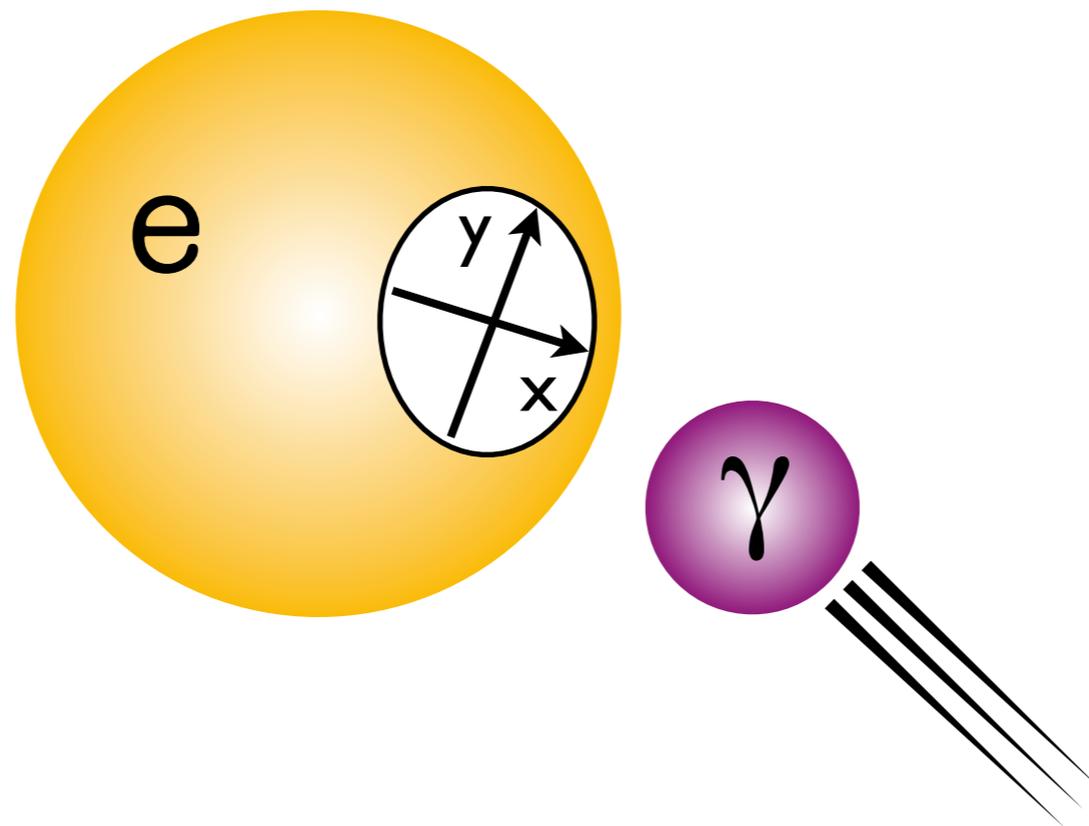


電子がこの位置から、、、この位置に移動した時
内部空間が回転してしまっているかもしれません。

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

素粒子が持つ**内部空間の回転対称性**みたいなもの

内部空間????? **回転対称性**??????

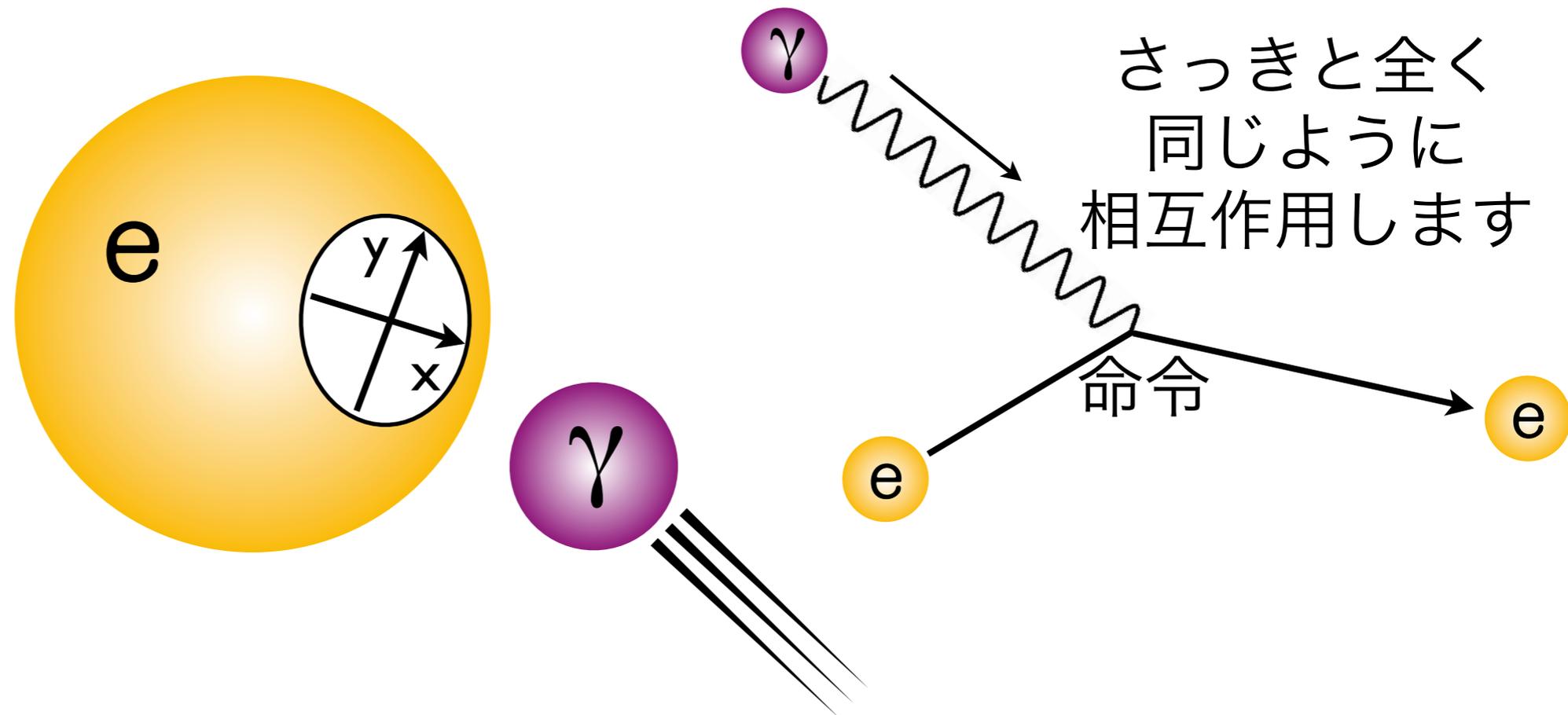


でも光子はそんなことは全く気にせず、
電子の内部空間に飛び込んできます

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

素粒子が持つ**内部空間の回転対称性**みたいなもの

内部空間????? **回転対称性**???????

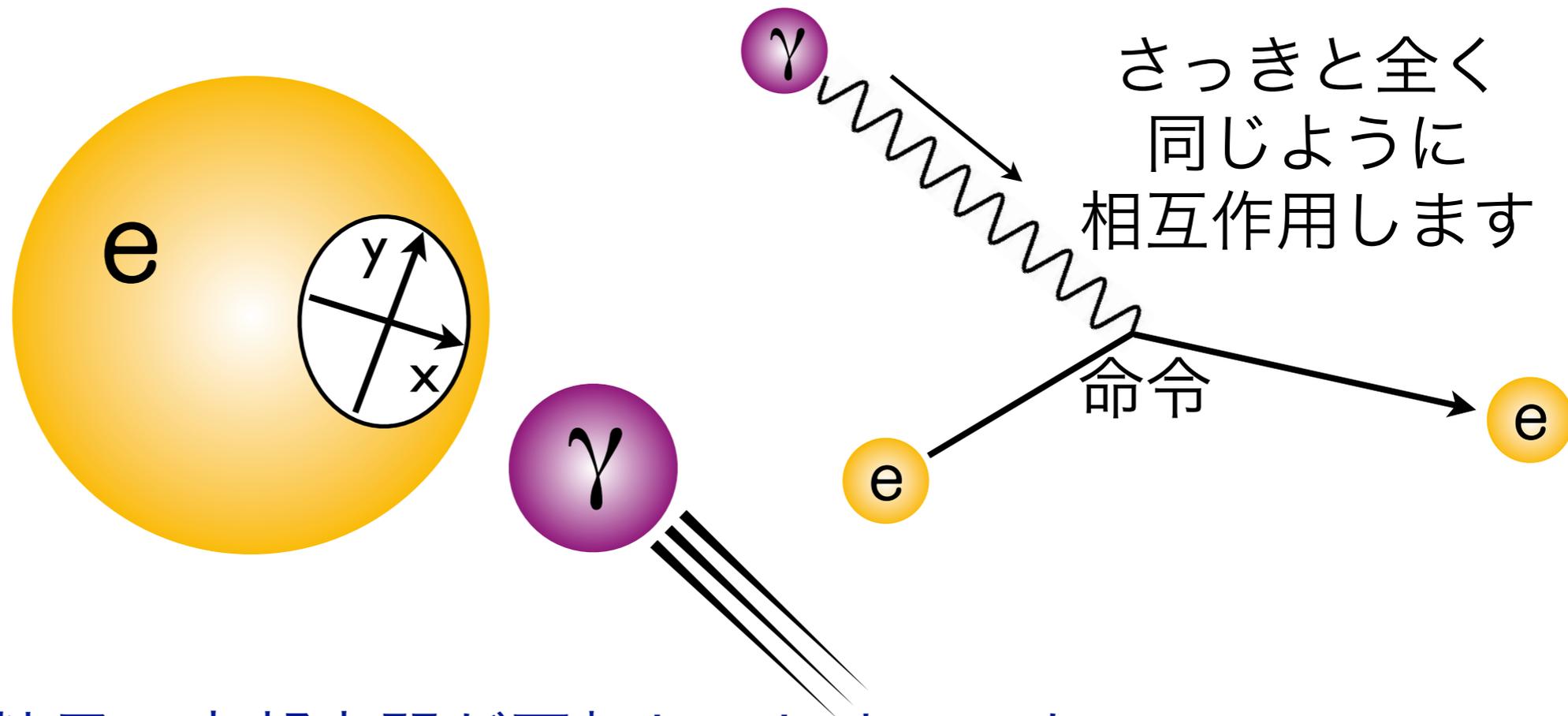


でも光子はそんなことは全く気にせず、電子の内部空間に飛び込んできます

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

素粒子が持つ**内部空間の回転対称性**みたいなもの

内部空間????? **回転対称性**??????

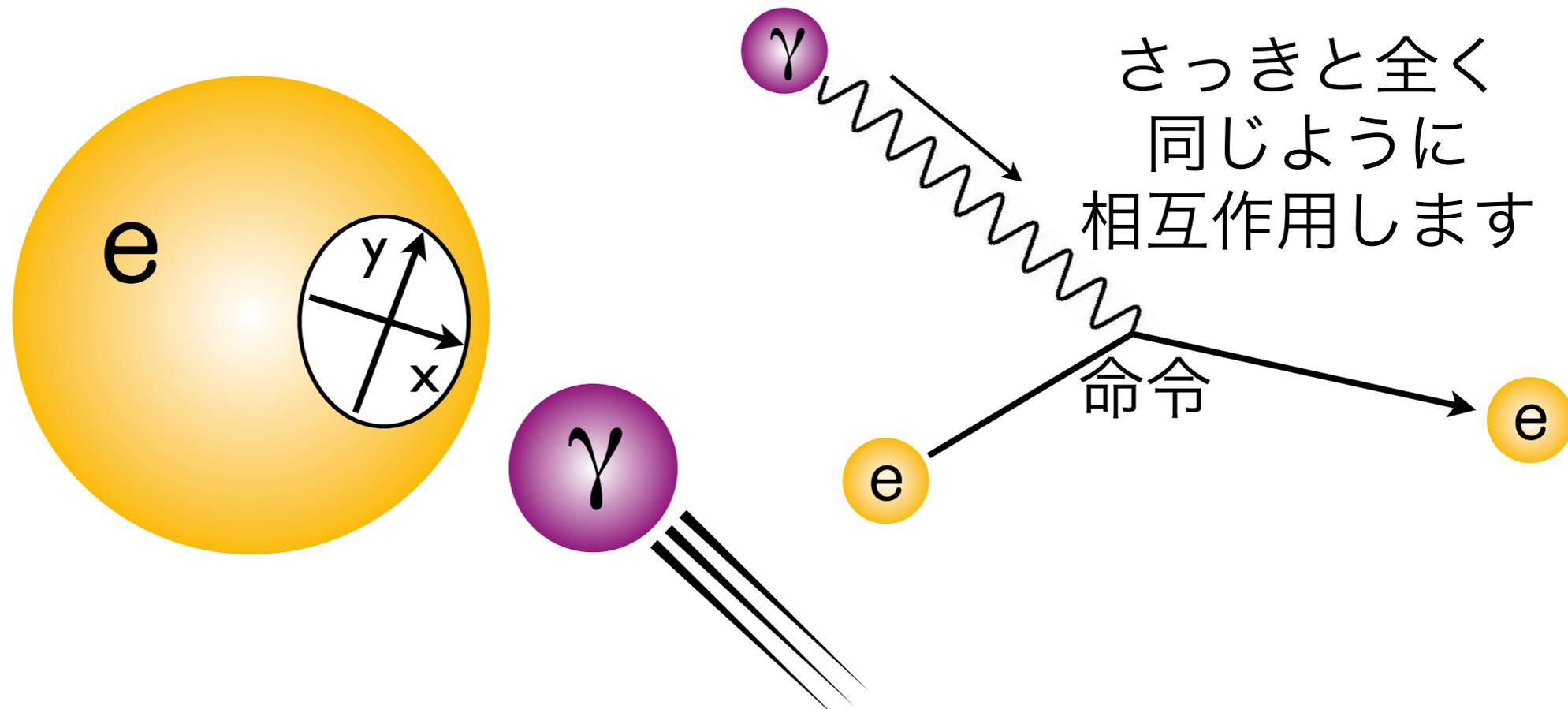


このように、素粒子の内部空間が回転してしまっても理論が不変であるようなとき、この理論は**内部空間の回転に対して対称性を持つ**と言います。

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

素粒子が持つ内部空間の回転対称性みたいなもの

内部空間????? 回転対称性???????

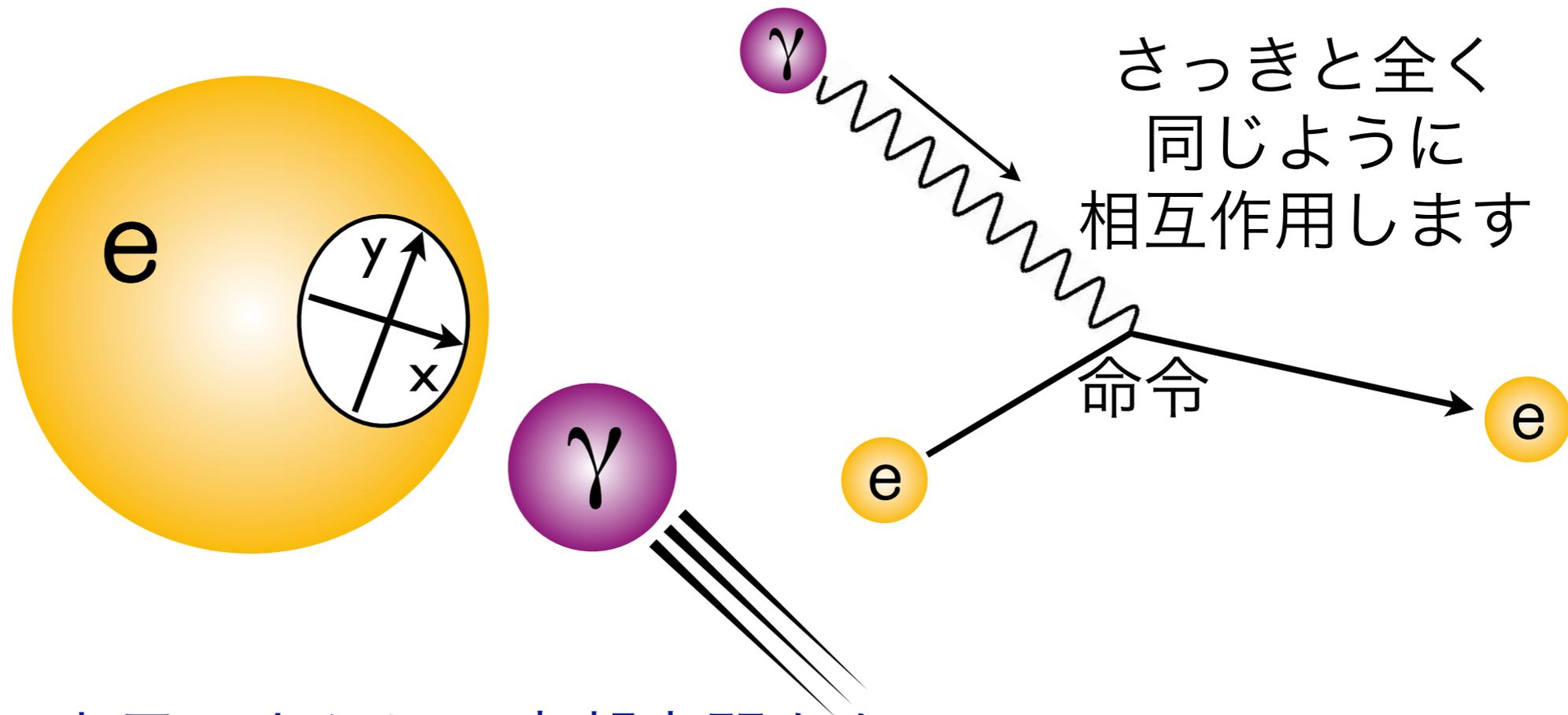


この内部空間の回転にはゲージ変換という特別な名前がついているため、理論がゲージ対称性を持つ、という言い方もします。

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

素粒子が持つ内部空間の回転対称性みたいなもの

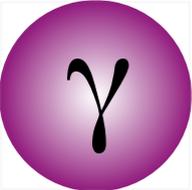
内部空間????? 回転対称性???????



また、この場合の光子のように、内部空間をもつ素粒子の間でやり取りされることにより力を伝達する粒子のことをゲージ粒子と言います。

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

これまでに存在が確認されているゲージ粒子

| 名前 | 内部空間の種類 | 媒介する力 | |
|---|-------------------|---------|------|
|  | グルーオン | $SU(3)$ | 強い力 |
|  | ウィークボソン (Wボソン) | $SU(2)$ | 弱い力 |
|  | (Zボソン) | | |
|  | 光子 | $U(1)$ | 電磁気力 |

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

ゲージ対称性のすごいところは、理論がゲージ対称性をもつべしと要請した途端、ラグランジアンの中にどのような項（命令）がどのような割合で存在するかがかなりの部分決まってしまうって、しかもそれをもとに行った計算の多くが現実世界を再現するところ

そして（今日は変な説明の仕方をしてしまったので分からないと思いますが）**実は、力を媒介するゲージ粒子の存在自体、ゲージ対称性の要請から生まれて来たものなのです**

ゲージ対称性とはなにか ★★★★★

ゲージ対称性のすごいところは、理論がゲージ対称性をもつべしと要請した途端、ラグランジアンの中にどのような項（命令）がどのような割合で存在するかがかなりの部分決まってしまうって、しかもそれをもとに行った計算の多くが現実世界を再現するところ

そして（今日は変な説明の仕方をしてしまったので分からないと思いますが）**実は、力を媒介するゲージ粒子の存在自体、ゲージ対称性の要請から生まれて来たものなのです**

すばらしい！

ところが！！

ところが！！
ひとつ大問題が！！！！

ところが！！

ひとつ大問題が！！！！

ゲージ粒子は質量を持ってない！

ゲージ対称性を要請すると、ゲージ粒子の
質量項（一時停止の命令）が書けない

ところが！！

ひとつ大問題が！！！！

ゲージ粒子は質量を持ってない！

ゲージ対称性を要請すると、ゲージ粒子の
質量項（一時停止の命令）が書けない

弱い相互作用を媒介するゲージ粒子には
質量があることが実験的に分かっています。。。。

ところが！！

ひとつ大問題が！！！！

ゲージ粒子は質量を持ってない！

ゲージ対称性を要請すると、ゲージ粒子の
質量項（一時停止の命令）が書けない

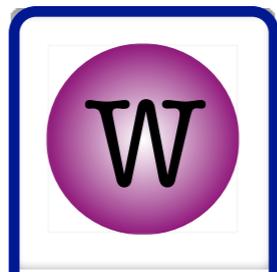
弱い相互作用を媒介するゲージ粒子には
質量があることが実験的に分かっています。。。。

**ゲージ粒子が質量を持ってないと言うのは、
ある意味ゲージ対称性の勝利の一部
だったのだけど、、、なぜなら、**

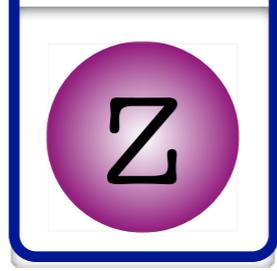
グルーオン
強い力



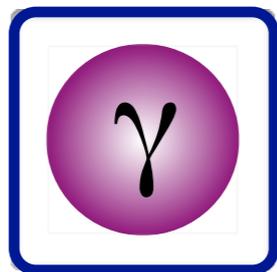
Wボソン
Zボソン



弱い力



光子
電磁気力

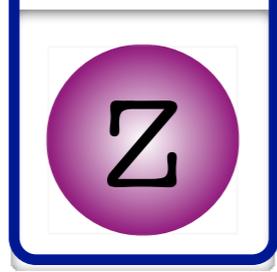
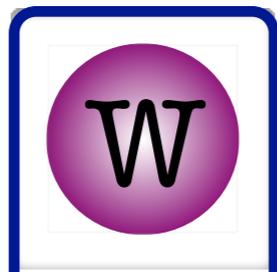


じっさいにグルーオンと光子は
質量を持っていません。

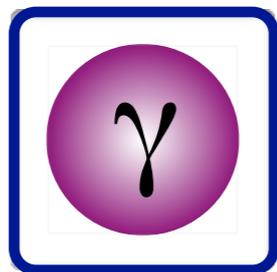
グルーオン
強い力



Wボソン
Zボソン
弱い力



光子
電磁気力



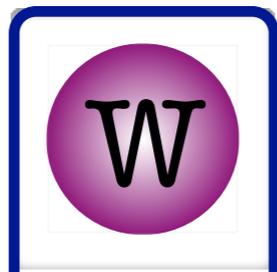
じっさいに**グルーオン**と**光子**は
質量を持っていません。

もう一度まとめると

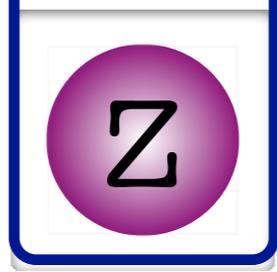
グルーオン
強い力



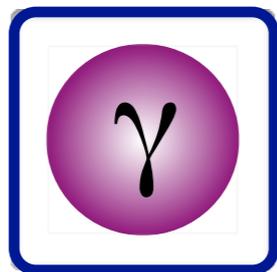
Wボソン
Zボソン



弱い力



光子
電磁気力



じっさいにグルーオンと光子は
質量を持っていません。

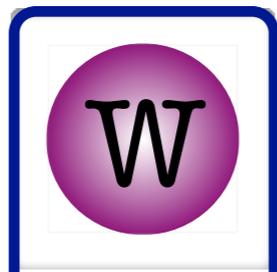
もう一度まとめると

理論にゲージ対称性を要求すれば

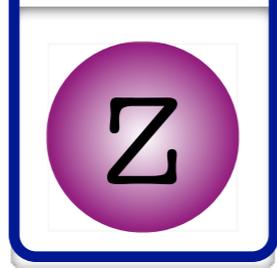
グルーオン
強い力



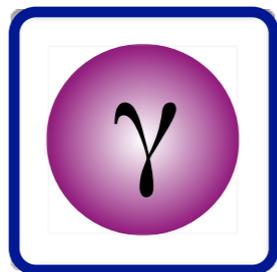
Wボソン
Zボソン



弱い力



光子
電磁気力



じっさいにグルーオンと光子は
質量を持っていません。

もう一度まとめると

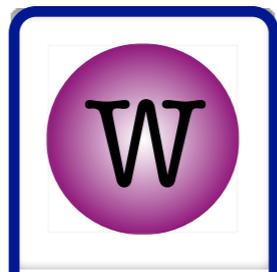
理論にゲージ対称性を要求すれば

- ・ 3つの力に対応してそれぞれゲージ粒子が存在することを説明し

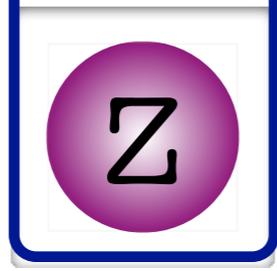
グルーオン
強い力



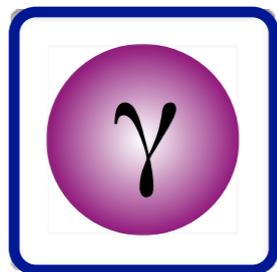
Wボソン
Zボソン



弱い力



光子
電磁気力



じっさいにグルーオンと光子は
質量を持っていません。

もう一度まとめると

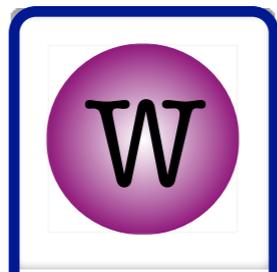
理論にゲージ対称性を要求すれば

- ・ 3つの力に対応してそれぞれゲージ粒子が存在することを説明し
- ・ 光子とグルーオンが質量のない粒子であることを説明し

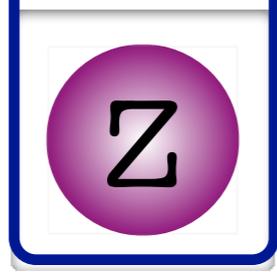
グルーオン
強い力



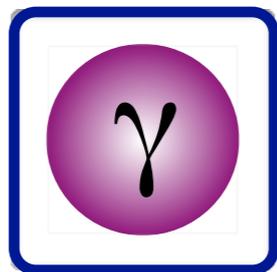
Wボソン
Zボソン



弱い力



光子
電磁気力



じっさいに**グルーオン**と**光子**は
質量を持っていません。

もう一度まとめると

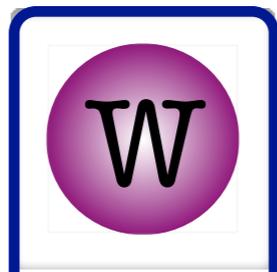
理論に**ゲージ対称性**を要求すれば

- ・ 3つの力に対応してそれぞれゲージ粒子が存在することを説明し
- ・ 光子とグルーオンが質量のない粒子であることを説明し
- ・ ゲージ粒子同士、およびゲージ粒子と物質粒子との相互作用も正しく説明できる

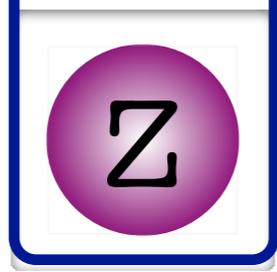
グルーオン
強い力



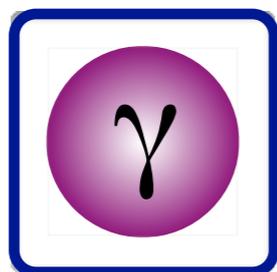
Wボソン
Zボソン



弱い力



光子
電磁気力



じっさいに**グルーオン**と**光子**は
質量を持っていません。

もう一度まとめると

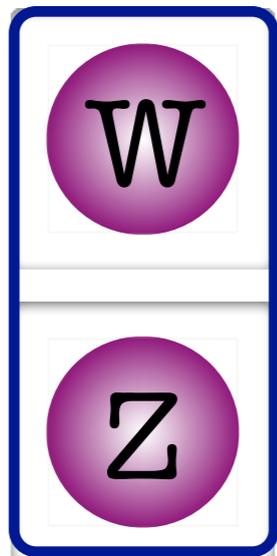
理論に**ゲージ対称性**を要求すれば

- ・ 3つの力に対応してそれぞれゲージ粒子が存在することを説明し
- ・ 光子とグルーオンが質量のない粒子であることを説明し
- ・ ゲージ粒子同士、およびゲージ粒子と物質粒子との相互作用も正しく説明できる
- ・ **W、Zボソンが質量を持っていることだけが説明できない**

グルーオン
強い力

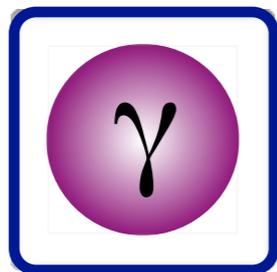


Wボソン
Zボソン



弱い力

光子
電磁気力



じっさいに**グルーオン**と**光子**は
質量を持っていません。

もう一度まとめると

理論に**ゲージ対称性**を要求すれば

- 3つの力に対応してそれぞれゲージ粒子が存在することを説明し
- 光子とグルーオンが質量のない粒子であることを説明し
- ゲージ粒子同士、およびゲージ粒子と物質粒子との相互作用も正しく説明できる

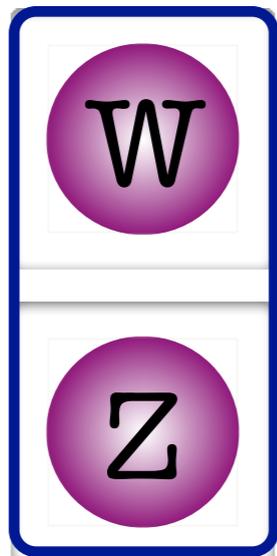
これほどまでにうまく
行っていると、

- W、Zボソンが質量を持っている
こと**だけ**が説明できない

グルーオン
強い力

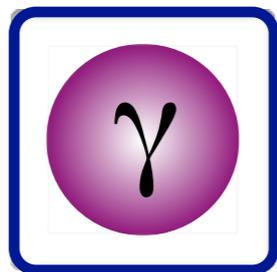


Wボソン
Zボソン



弱い力

光子
電磁気力



じっさいに**グルーオン**と**光子**は質量を持っていません。

理論に**ゲージ対称性**を要求すれば

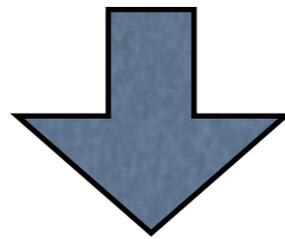
- ・ 3つの力に対応してそれぞれゲージ粒子が存在することを説明し
- ・ 光子とグルーオンが質量のない粒子であることを説明し
- ・ ゲージ粒子同士、およびゲージ粒子と物質粒子との相互作用も正しく説明できる

これほどまでにうまく行っていると、**これが**ダメなくらいではゲージ対称性を捨てたくないという気持ちになる

- ・ **W、Zボソンが質量を持っていることだけが説明できない**

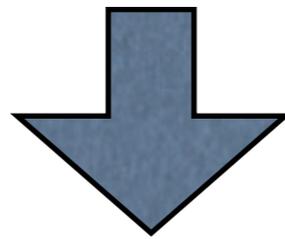
理論にはゲージ不変性をもたせたいけど、
W、Zボソンに質量を持たせなきゃいけない、、、
そのためにはゲージ不変性を破らなきゃいけない、、、
どうしよう、、、
ゲージ不変性をもつ理論の良い性質を保ったまま、
なんとかW、Zボソンに質量をもたせられないか、、、

理論にはゲージ不変性をもたせたいけど、
W、Zボソンに質量を持たせなきゃいけない、、、
そのためにはゲージ不変性を破らなきゃいけない、、、
どうしよう、、、
ゲージ不変性をもつ理論の良い性質を保ったまま、
なんとかW、Zボソンに質量をもたせられないか、、、



対称性の自発的破れ

理論にはゲージ不変性をもたせたいけど、
W、Zボソンに質量を持たせなきゃいけない、、、
そのためにはゲージ不変性を破らなきゃいけない、、、
どうしよう、、、
ゲージ不変性をもつ理論の良い性質を保ったまま、
なんとかW、Zボソンに質量をもたせられないか、、、

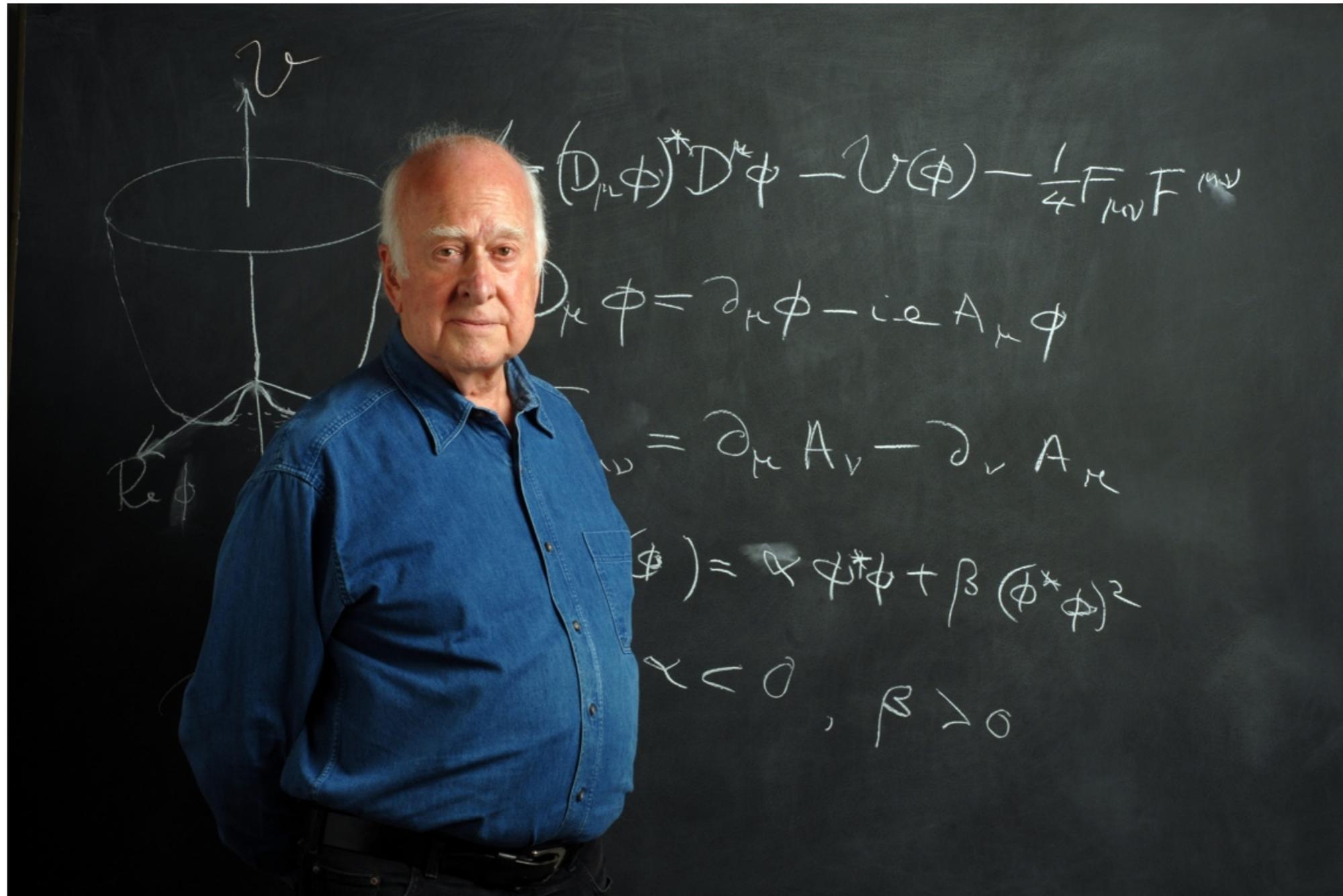


対称性の自発的破れ

(2008年に南部さんがノーベル賞を受賞したときに
この言葉を聞いた方もおおいかもしれません。)

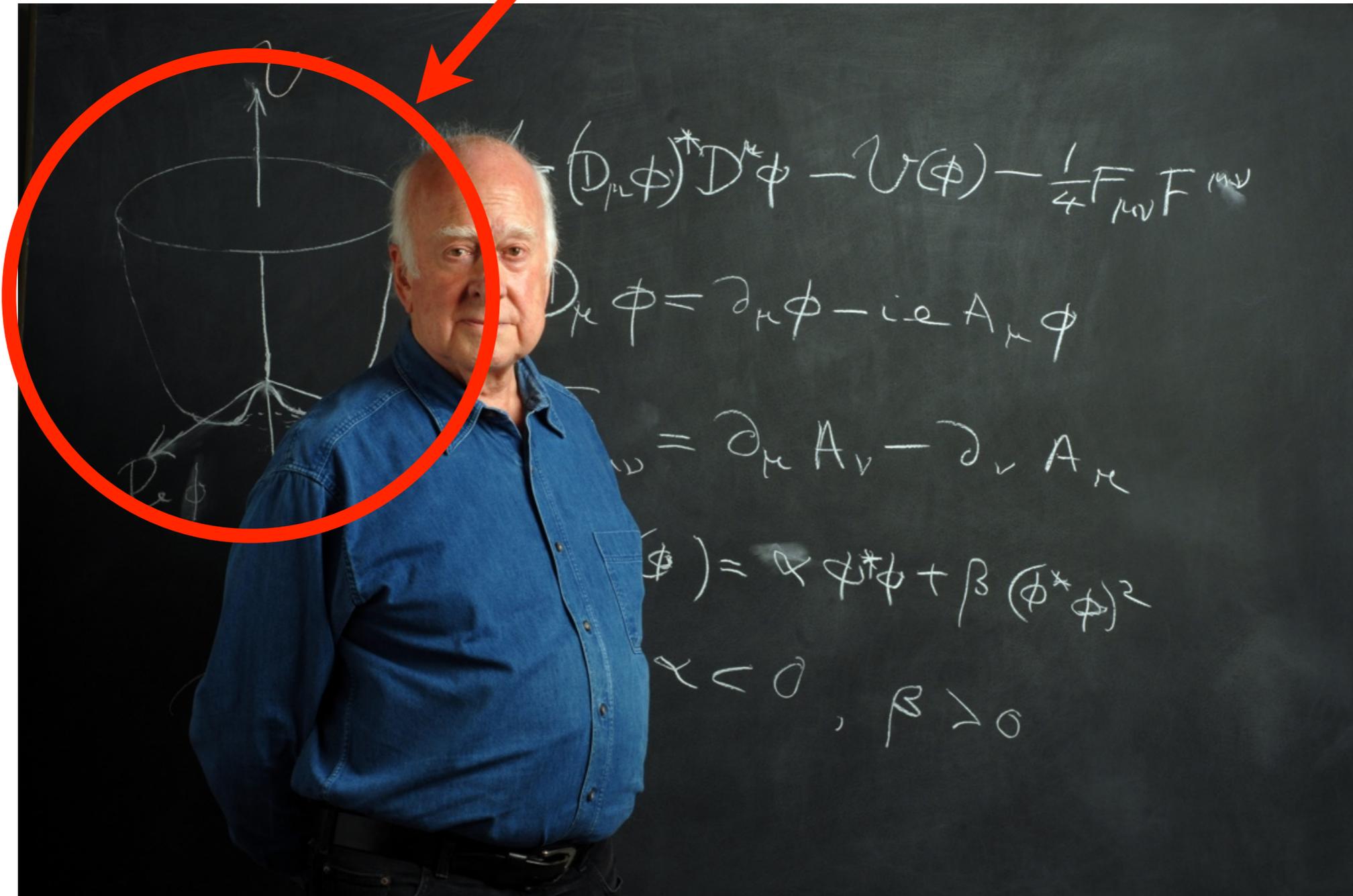
対称性の自発的破れとはなにか ★★

(この写真の中に隠れています。)



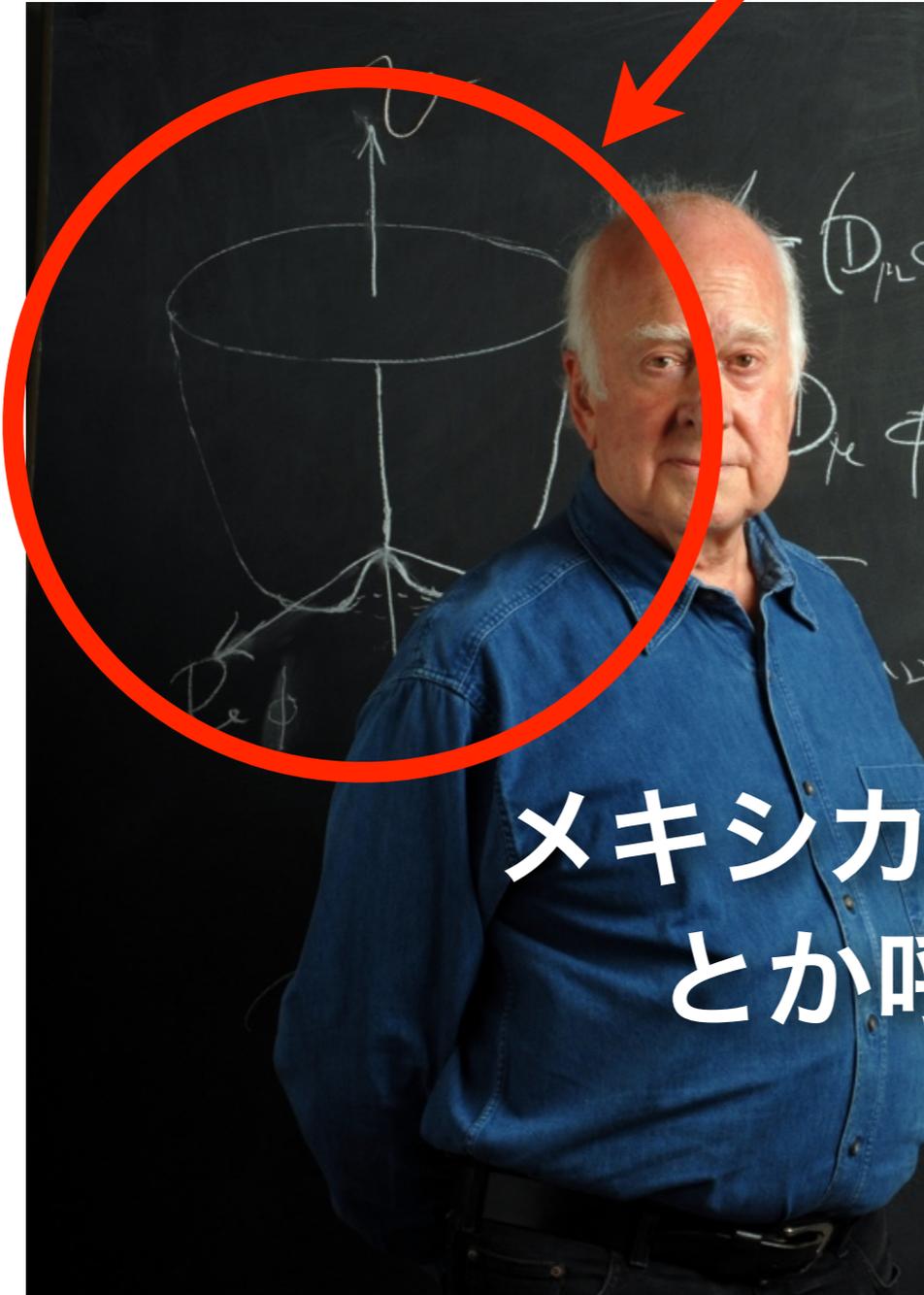
対称性の自発的破れとはなにか ☆☆☆

これです



対称性の自発的破れとはなにか ☆☆☆

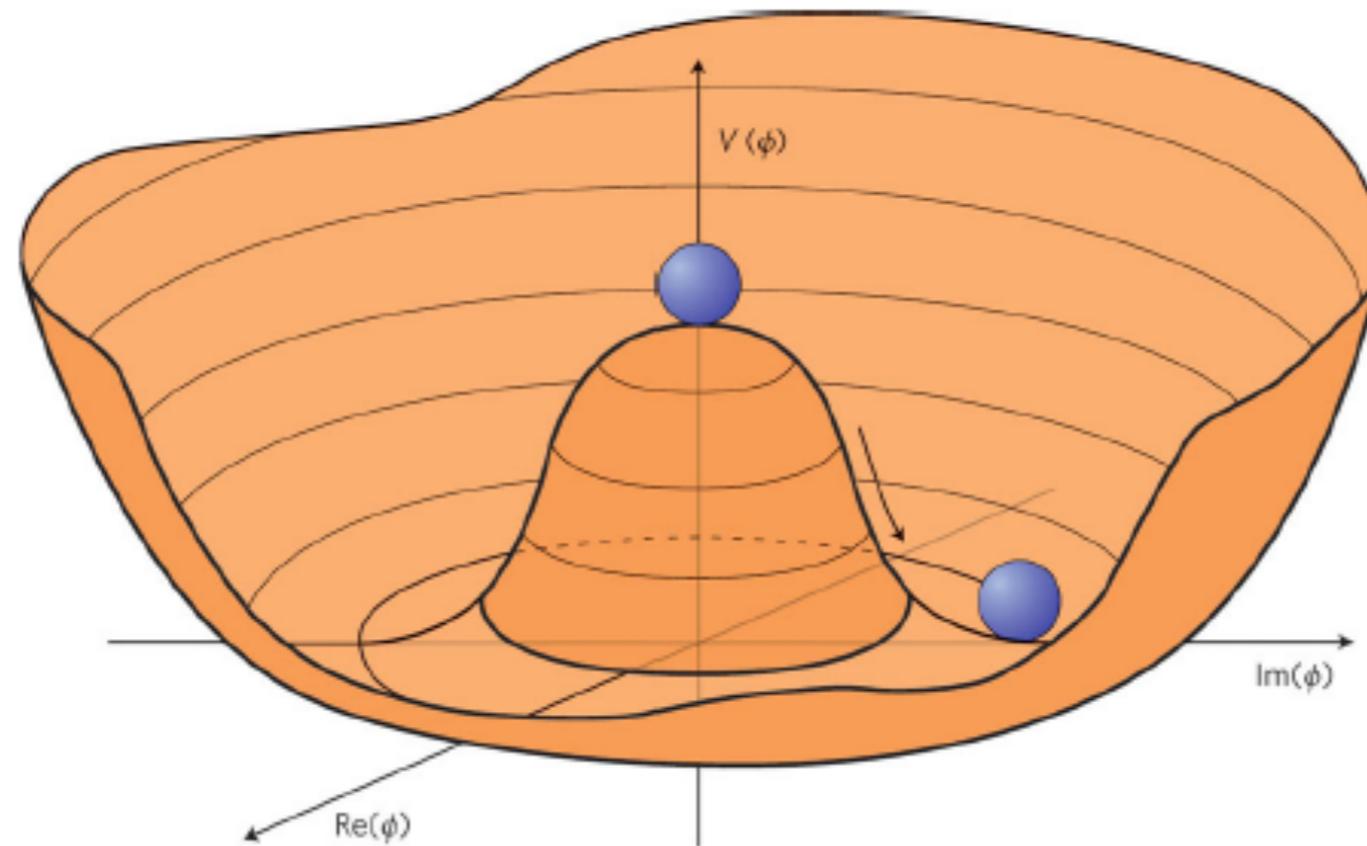
これです



メキシカンハット・ポテンシャル
とか呼ばれているものです

対称性の自発的破れとはなにか ☆☆☆

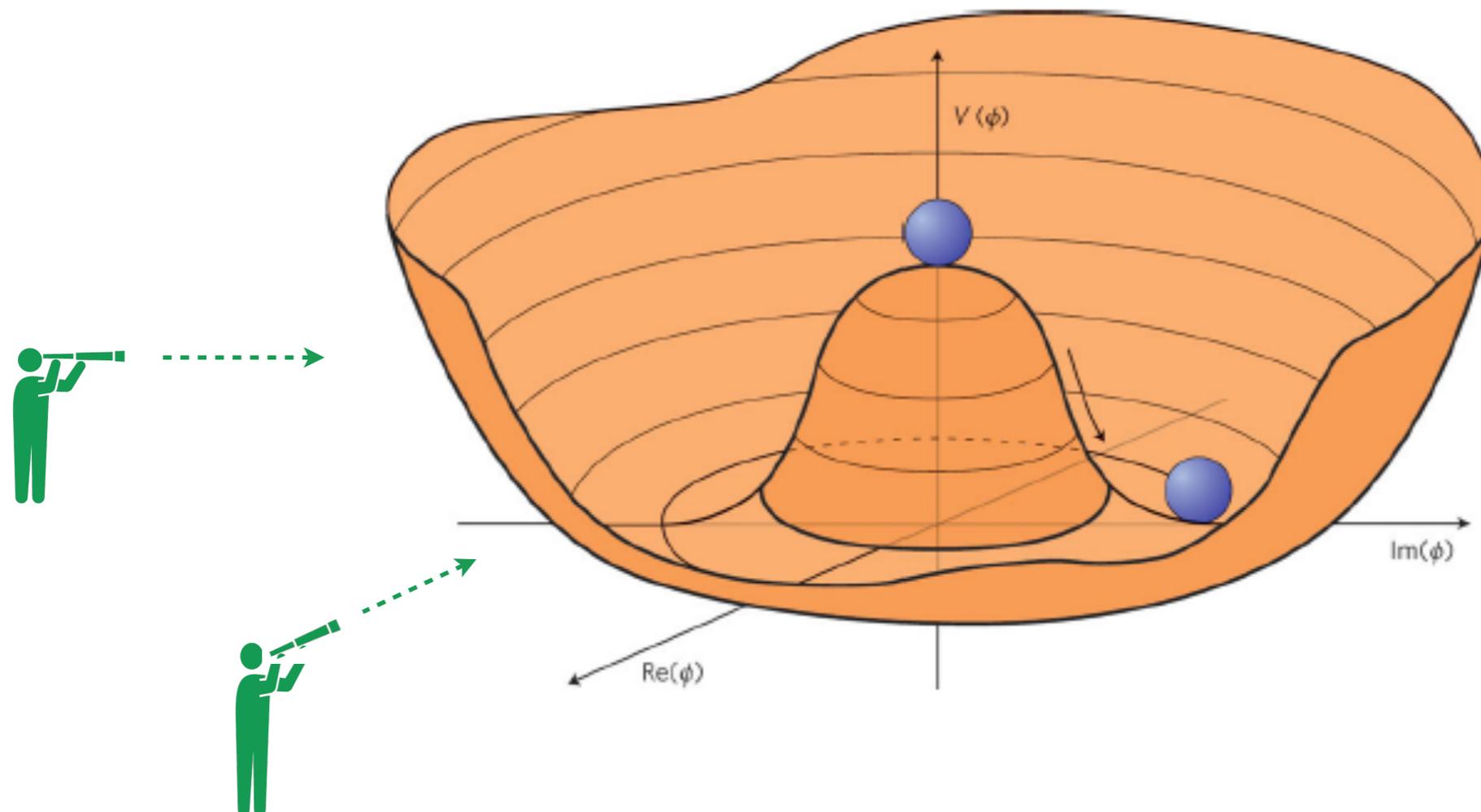
メキシカン・ハットとボール



対称性の自発的破れとはなにか ☆☆☆

メキシカン・ハットとボール

メキシカン・ハット自体はどちらの方向から見ても同じ

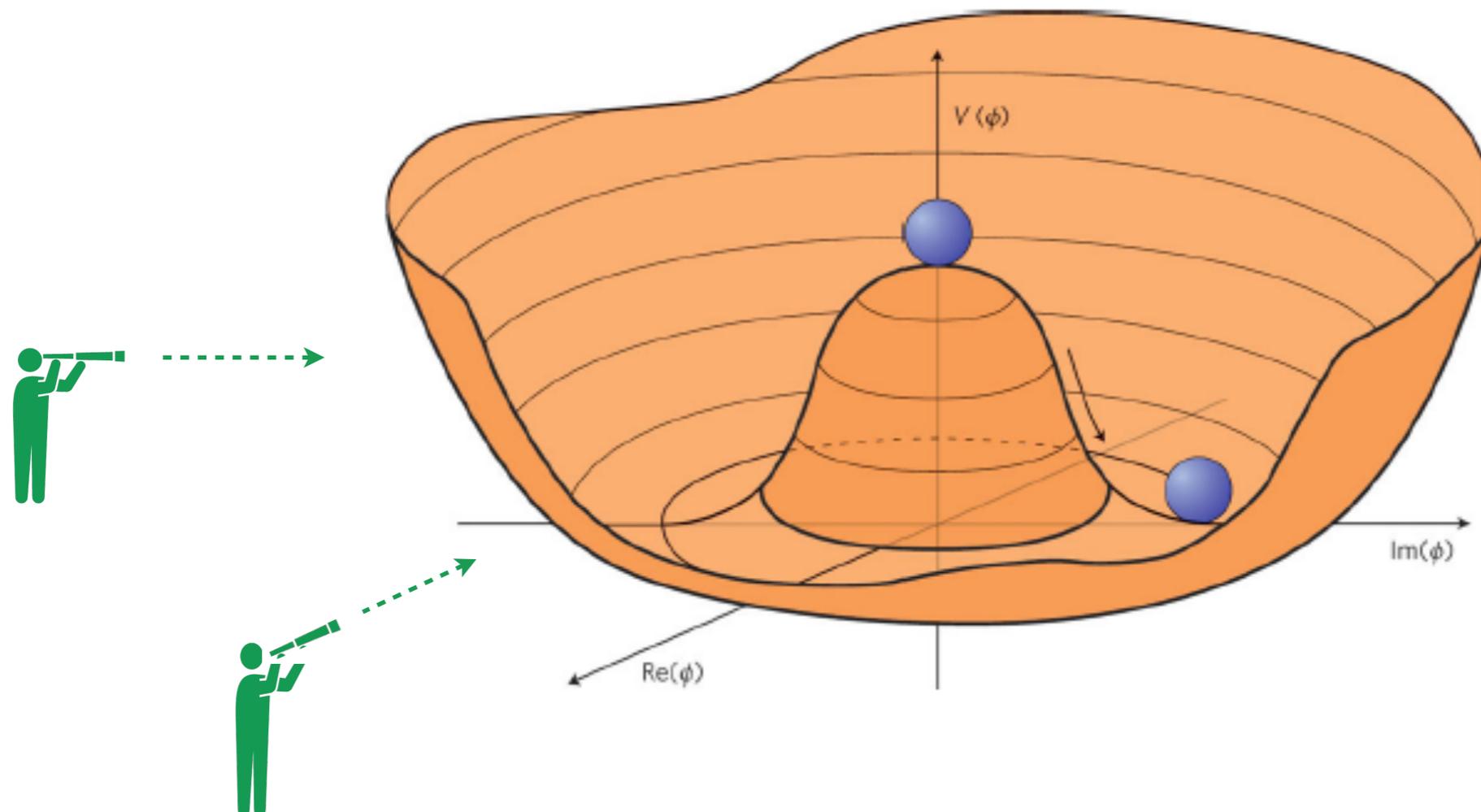


対称性の自発的破れとはなにか ★★

メキシカン・ハットとボール

メキシカン・ハット自体はどちらの方向から見ても同じ

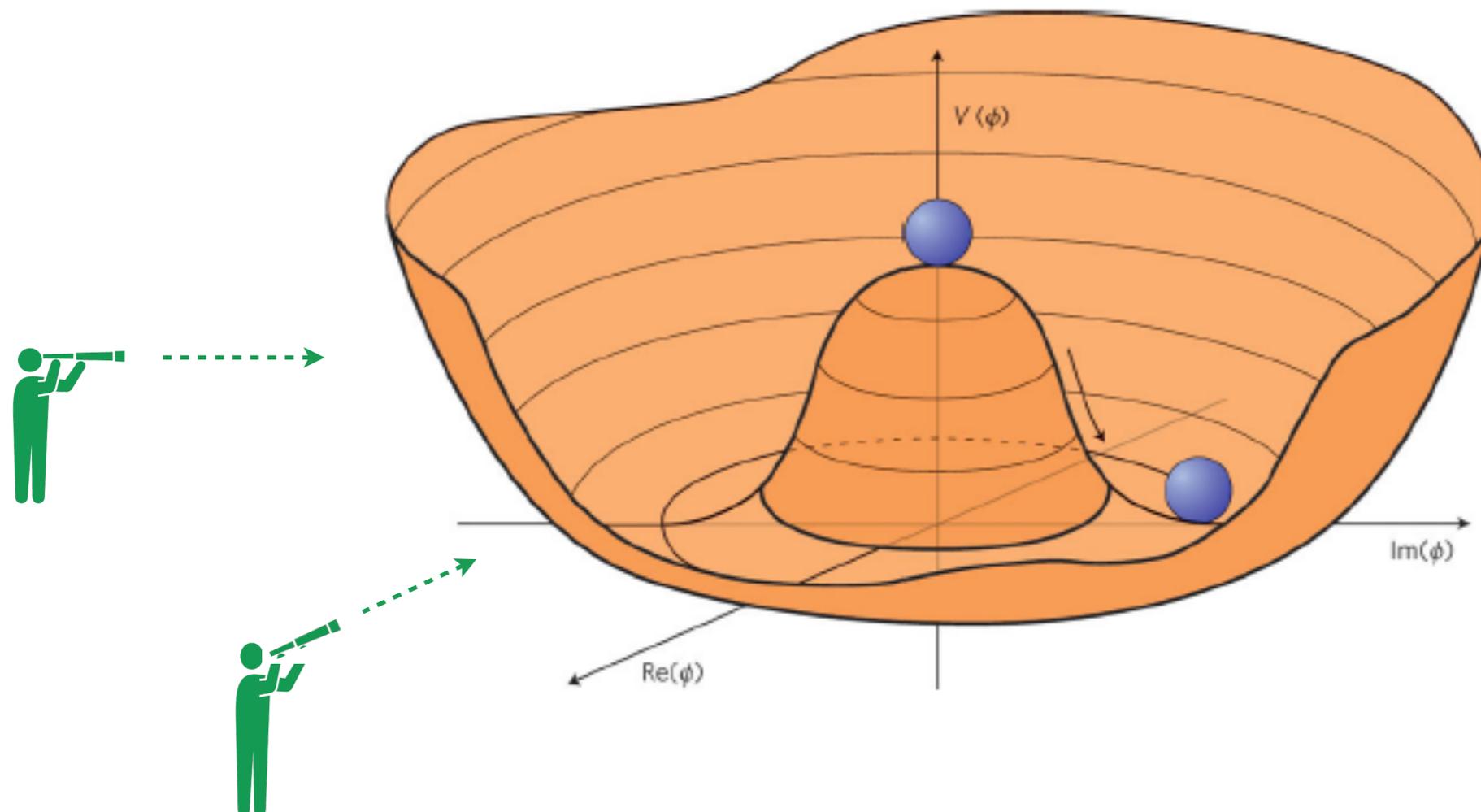
(理論が回転対称性を持つ)



対称性の自発的破れとはなにか ★★

メキシカン・ハットとボール

ここにボールを一個投げ入れると、、、ボールは谷底に落ちて、見る方向によって違う景色が見えることになります

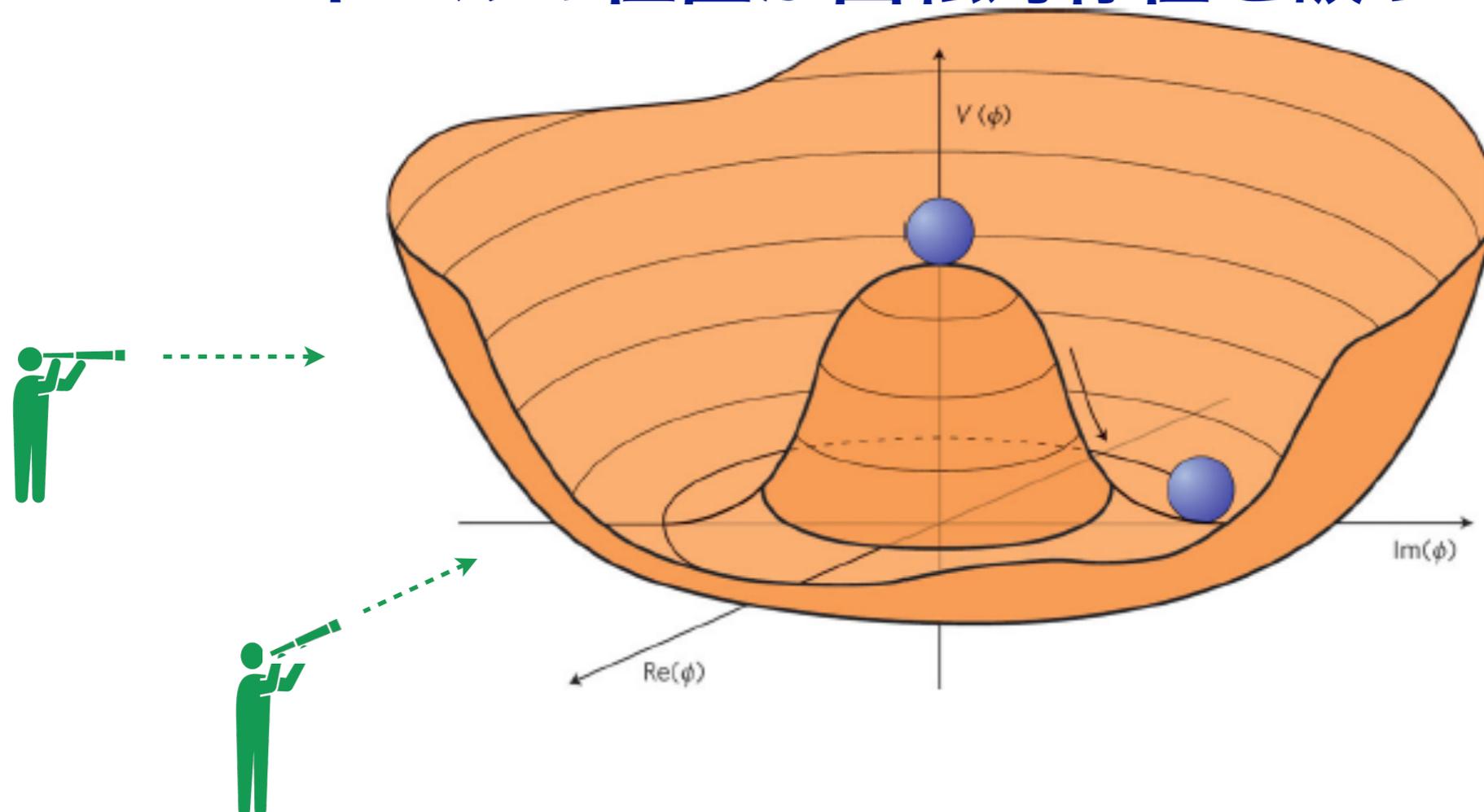


対称性の自発的破れとはなにか ★★☆☆

メキシカン・ハットとボール

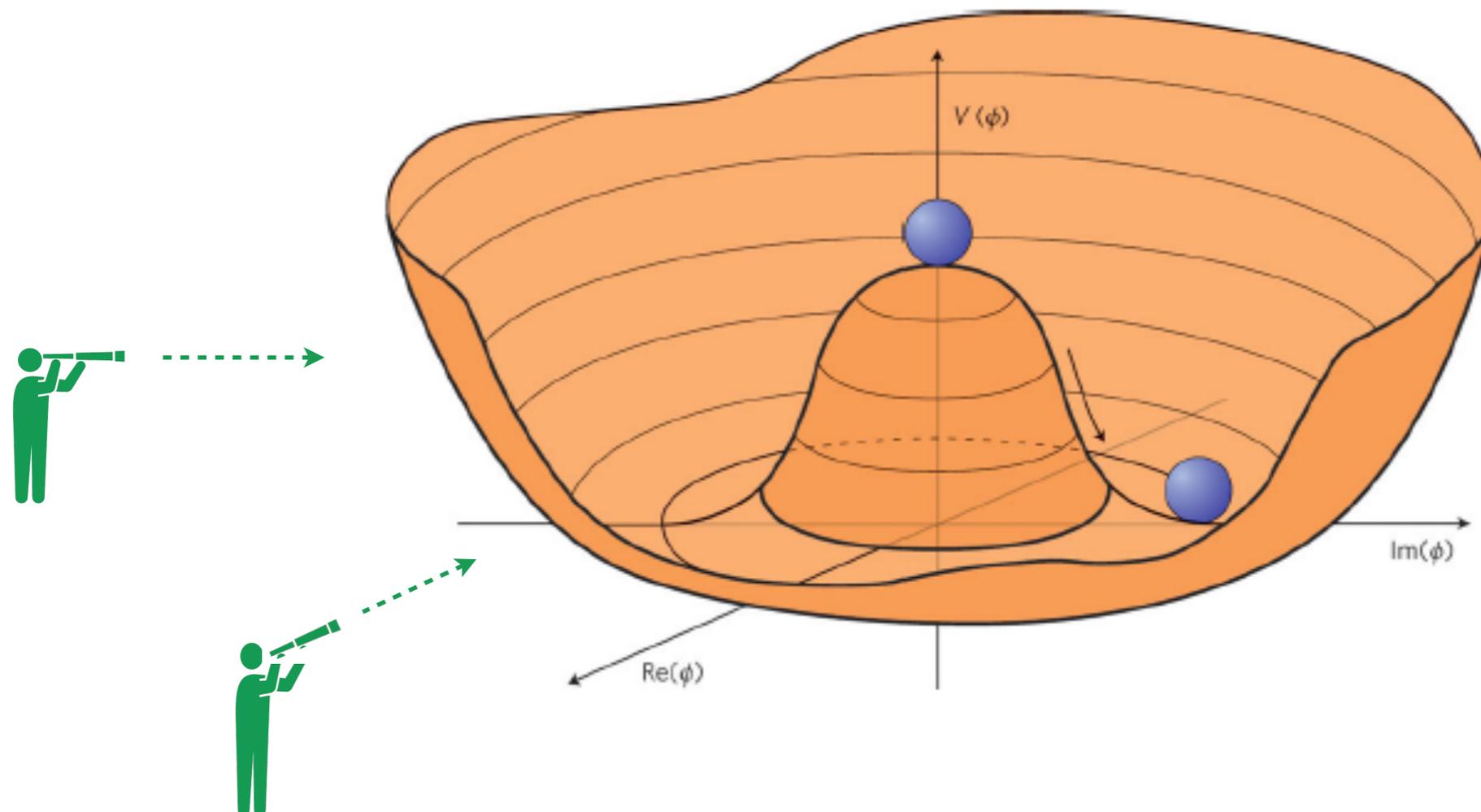
ここにボールを一個投げ入れると、、、ボールは谷底に落ちて、見る方向によって違う景色が見えることになります

ボールの位置が回転対称性を破っている



対称性の自発的破れとはなにか ☆☆☆

このように、**理論自体には対称性がある**のだけど、**実現する安定な状態はその対称性を破っている**状況を、**対称性が自発的に破れている**と言います



対称性の自発的破れとはなにか ☆☆☆

このように、**理論自体には対称性がある**のだけど、**実現する安定な状態はその対称性を破っている**状況を、**対称性が自発的に破れている**と言います

これをうまく使って、さっきやりたいと言ったこと、

「ゲージ不変性をもつ理論の良い性質を保ったまま、
なんとかW、Zボソンに質量をもたせられないか、、、」
を実現させることができます。

対称性の自発的破れとはなにか ☆☆☆

このように、**理論自体には対称性がある**のだけど、**実現する安定な状態はその対称性を破っている**状況を、**対称性が自発的に破れている**と言います

これをうまく使って、さっきやりたいと言ったこと、

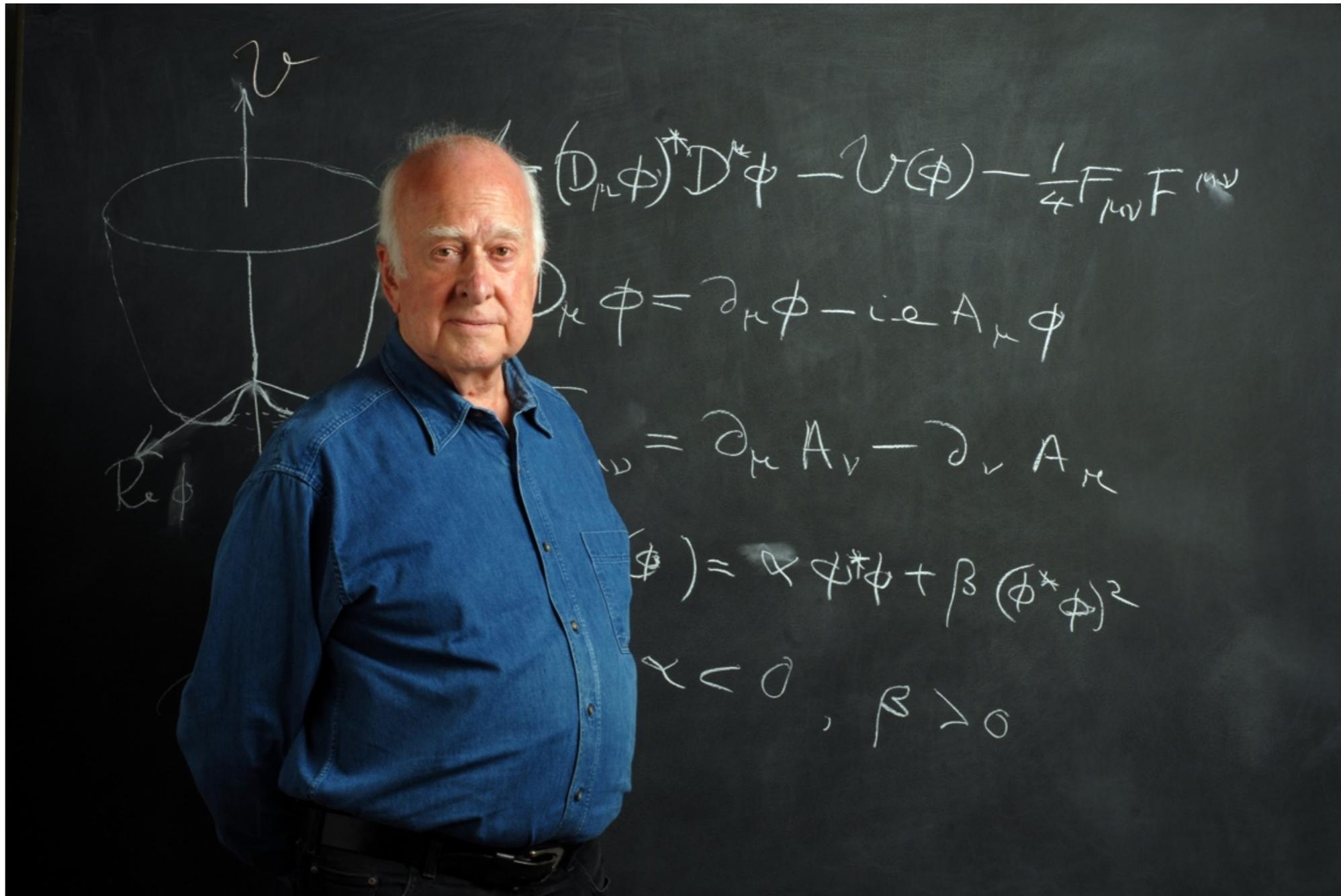
「ゲージ不変性をもつ理論の良い性質を保ったまま、
なんとかW、Zボソンに質量をもたせられないか、、、」
を実現させることができます。

ヒッグス機構

ヒッグス機構とヒッグス粒子 ★★★★★

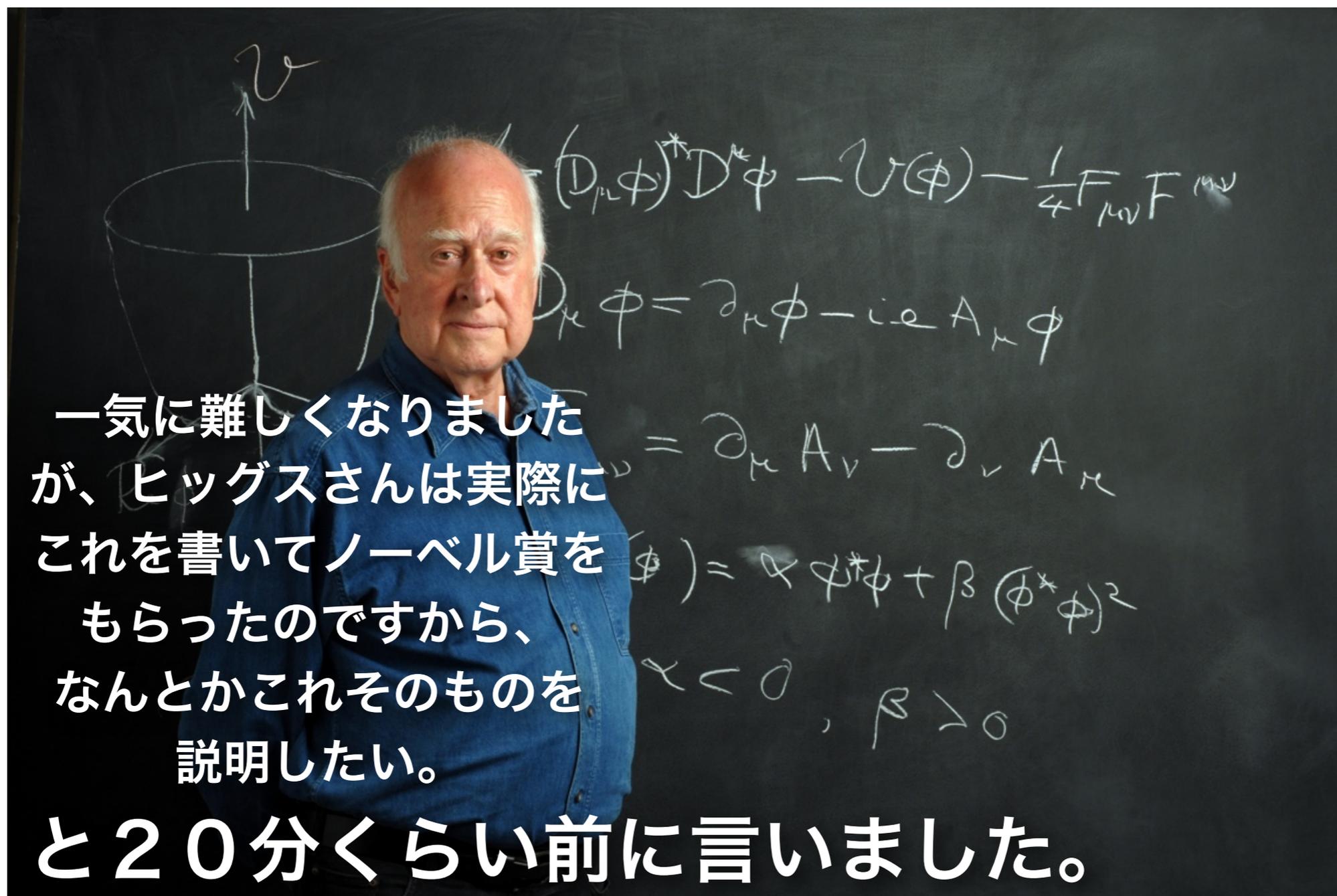
ヒッグス機構とヒッグス粒子 ★★★★★

やっぱりこの写真です。



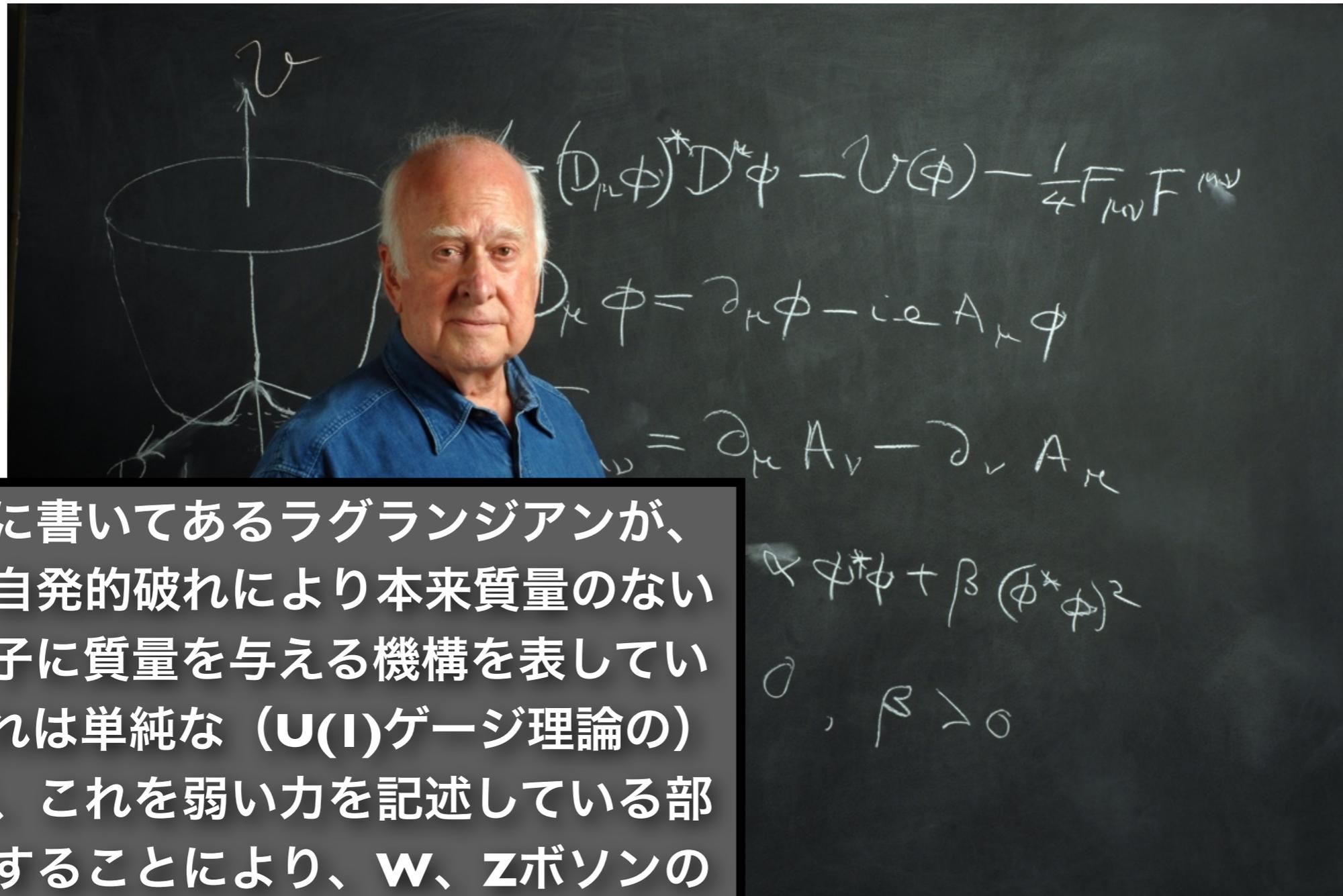
ヒッグス機構とヒッグス粒子 ★★★★★

やっぱりこの写真です。



ヒッグス機構とヒッグス粒子 ★★★★★

やっぱりこの写真です。



この黒板に書いてあるラグランジアンが、対称性の自発的破れにより本来質量のないゲージ粒子に質量を与える機構を表しています。これは単純な (U(1)ゲージ理論の) 例ですが、これを弱い力を記述している部分に応用することにより、W、Zボソンのみに質量を与えることができます。

そういえば、一時停止の命令（質量項）が
ラグランジアンのなかでどのように表されて
いるか一度も言っていませんでしたので、
言います。

そういえば、一時停止の命令（質量項）が
ラグランジアンのなかでどのように表されて
いるか一度も言っていませんでしたので、
言います。

ゲージ粒子の一時停止の命令（質量項）

$$m A_{\mu} A^{\mu}$$

そういえば、一時停止の命令（質量項）が
ラグランジアンのなかでどのように表されて
いるか一度も言っていませんでしたので、
言います。

ゲージ粒子の一時停止の命令（質量項）

$$m A_{\mu} A^{\mu}$$

この小っちゃい添字は
気にしないでください

そういえば、一時停止の命令（質量項）が
ラグランジアンの中かでどのように表されて
いるか一度も言っていませんでしたので、
言います。

ゲージ粒子の一時停止の命令（質量項）

$$m A_\mu A^\mu$$



これは**タダの数値**です
この値が大きいくほど、
一時停止の命令の出る
頻度が高くなります

そういえば、一時停止の命令（質量項）が
ラグランジアンの中かでどのように表されて
いるか一度も言っていないませんでしたので、
言います。

ゲージ粒子の一時停止の命令（質量項）

$$m A_{\mu} A^{\mu}$$


このように、同じものが二つ並んでるのが
一時停止の命令の特徴です。一個目で一旦
粒子を消して（一時停止）、二個目でもう一回
粒子を生成するとイメージしてください。

さて、この黒板のラグランジアンの中にゲージ粒子の質量項 $m A_\mu A^\mu$ (一時停止の命令) はあるでしょうか

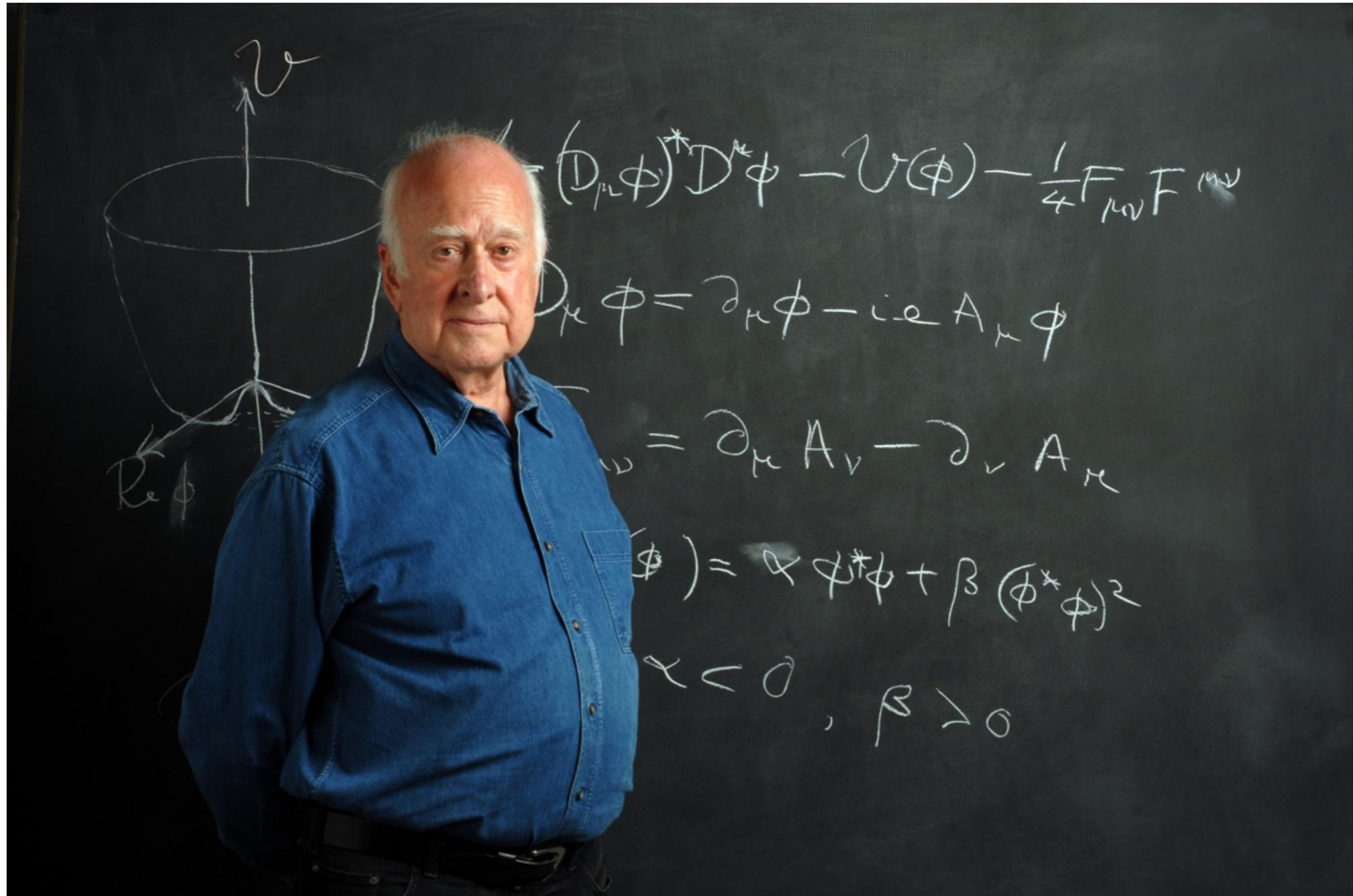
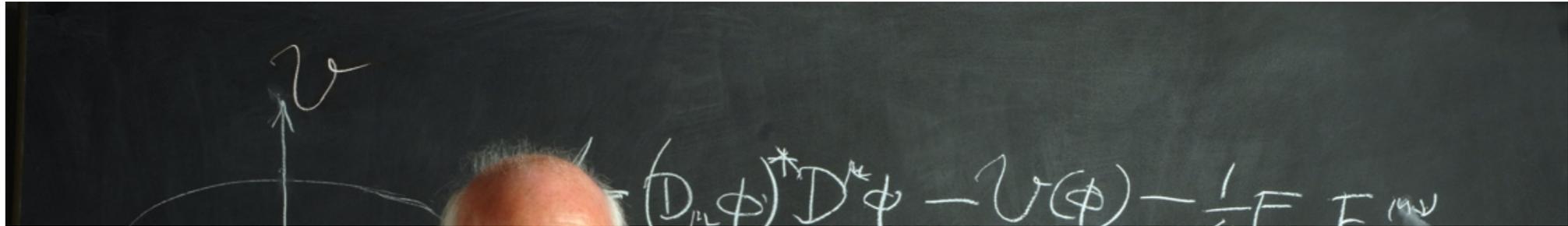


Photo: <http://www.ph.ed.ac.uk/higgs/galleries/peter-higgs-june-2009>

さて、この黒板のラグランジアンの中にゲージ粒子の質量項 $m A_\mu A^\mu$ (一時停止の命令) はあるでしょうか

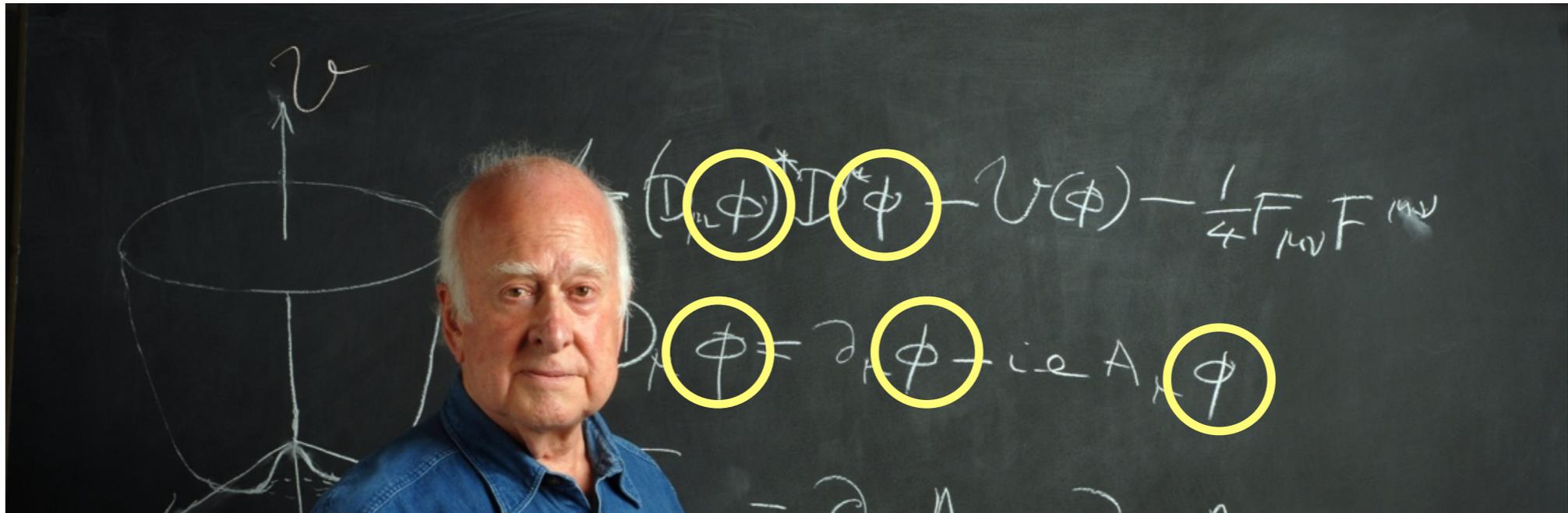


一見すると、ありません。そもそも、このラグランジアンはゲージ対称性を尊重するように書かれています。

そのようなラグランジアンでは、ゲージ粒子は全て質量が0になってしまうということは先ほど説明しました。

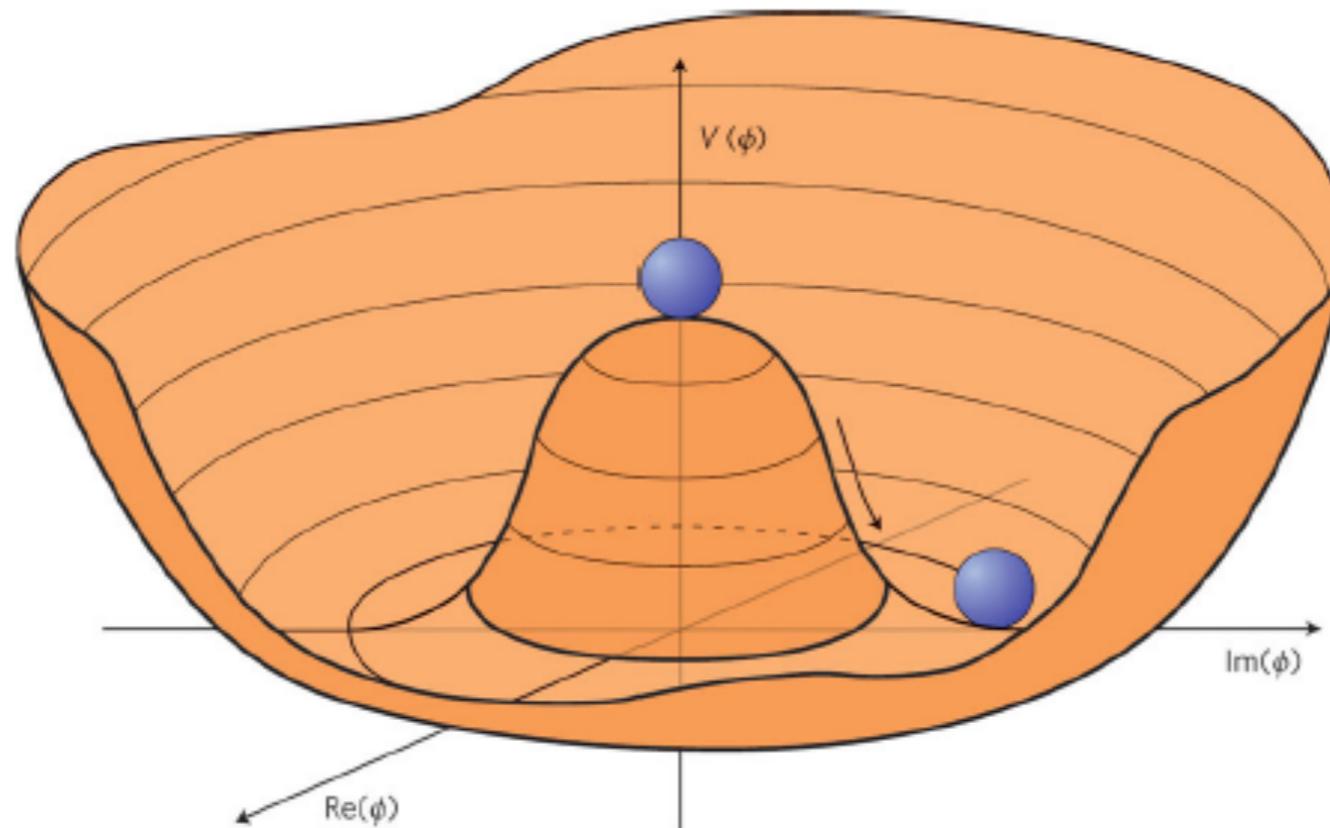
しかし、、、

さて、この黒板のラグランジアンの中にゲージ粒子の質量項 $m A_\mu A^\mu$ (一時停止の命令) はあるでしょうか



このラグランジアンには、**ヒッグス (Φ)** が含まれています。このヒッグスが、先ほどのゲージ対称性の自発的破れを実現します。

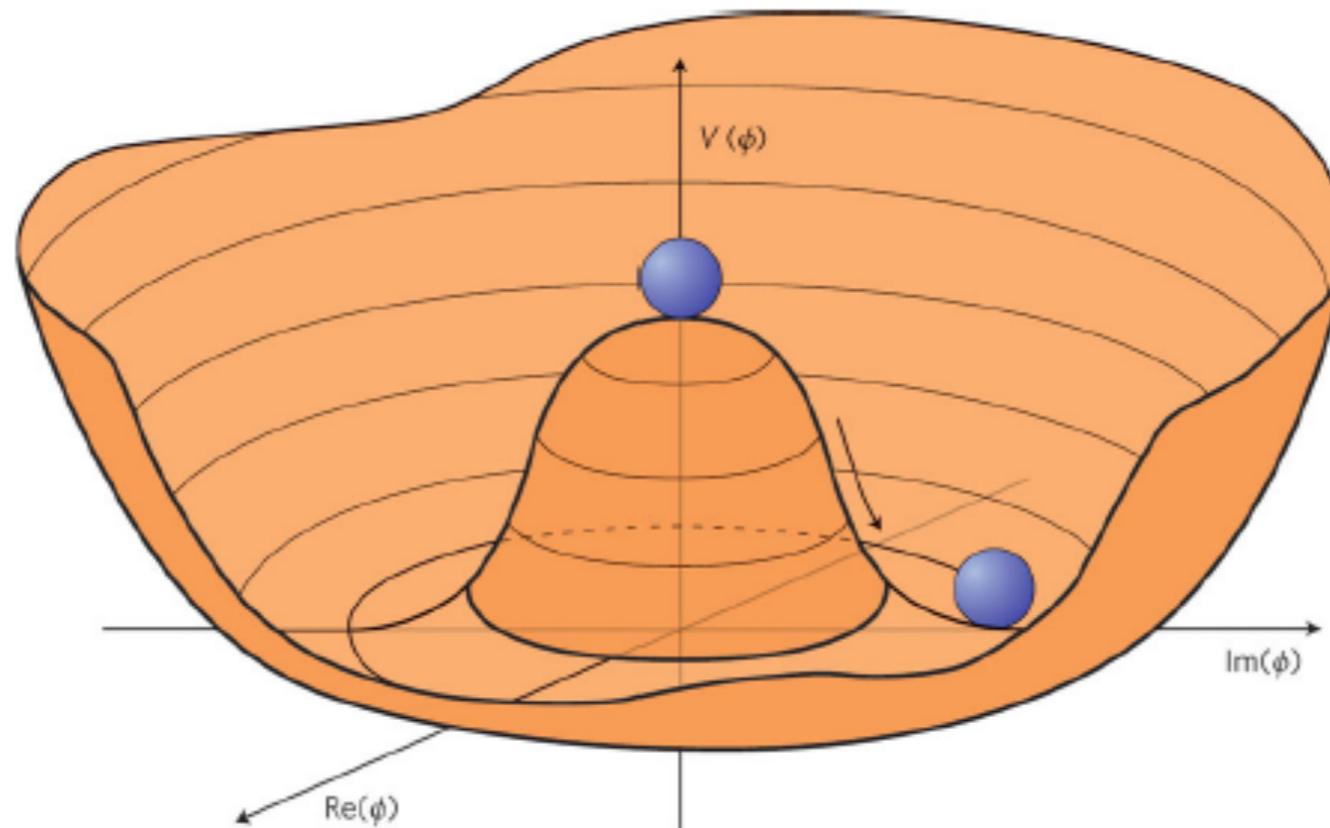
ヒッグスの内部空間



先ほど、**ボール**と言ったのは、じつは**粒子**を生成させたり消滅させたりする機械だったのだと思ってください。

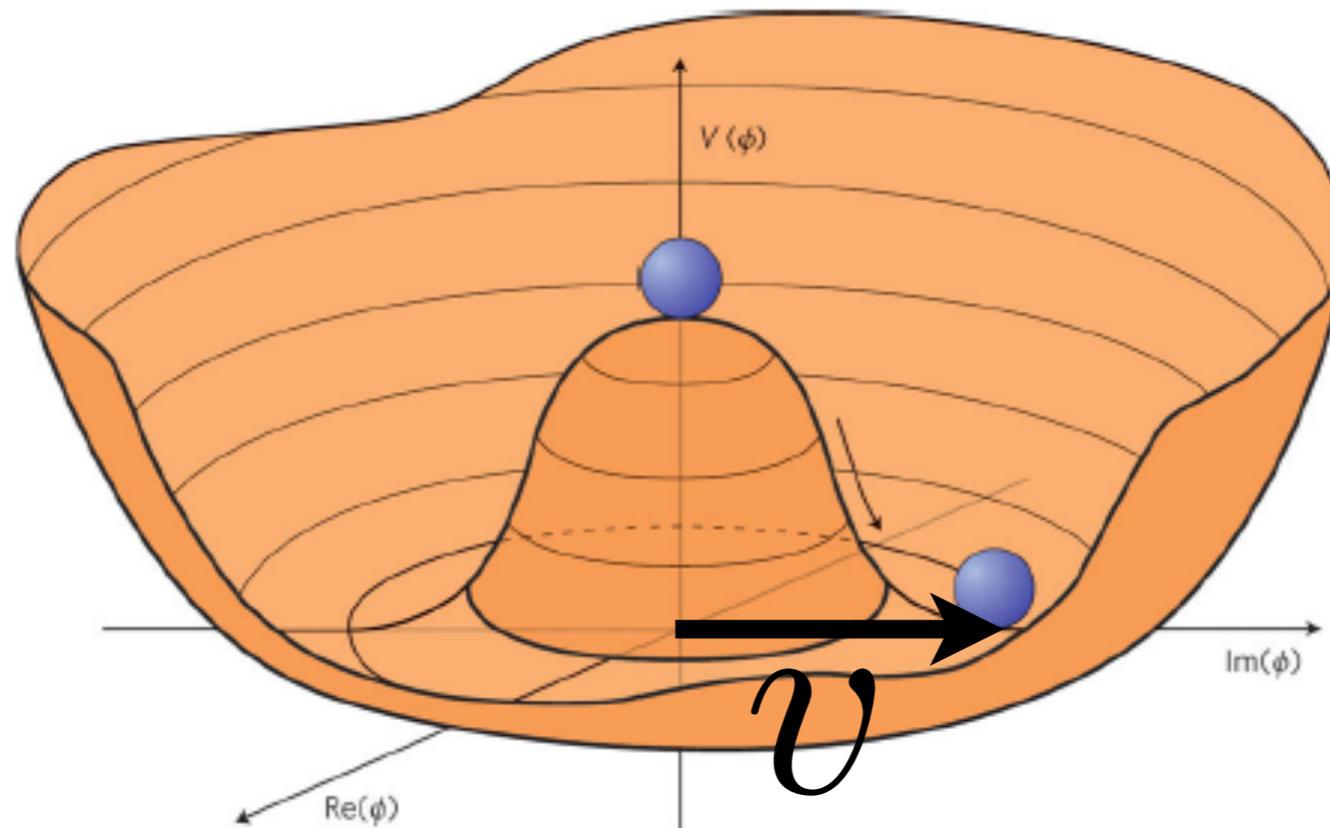
この場合、粒子=ヒッグス粒子です

ヒッグスの内部空間



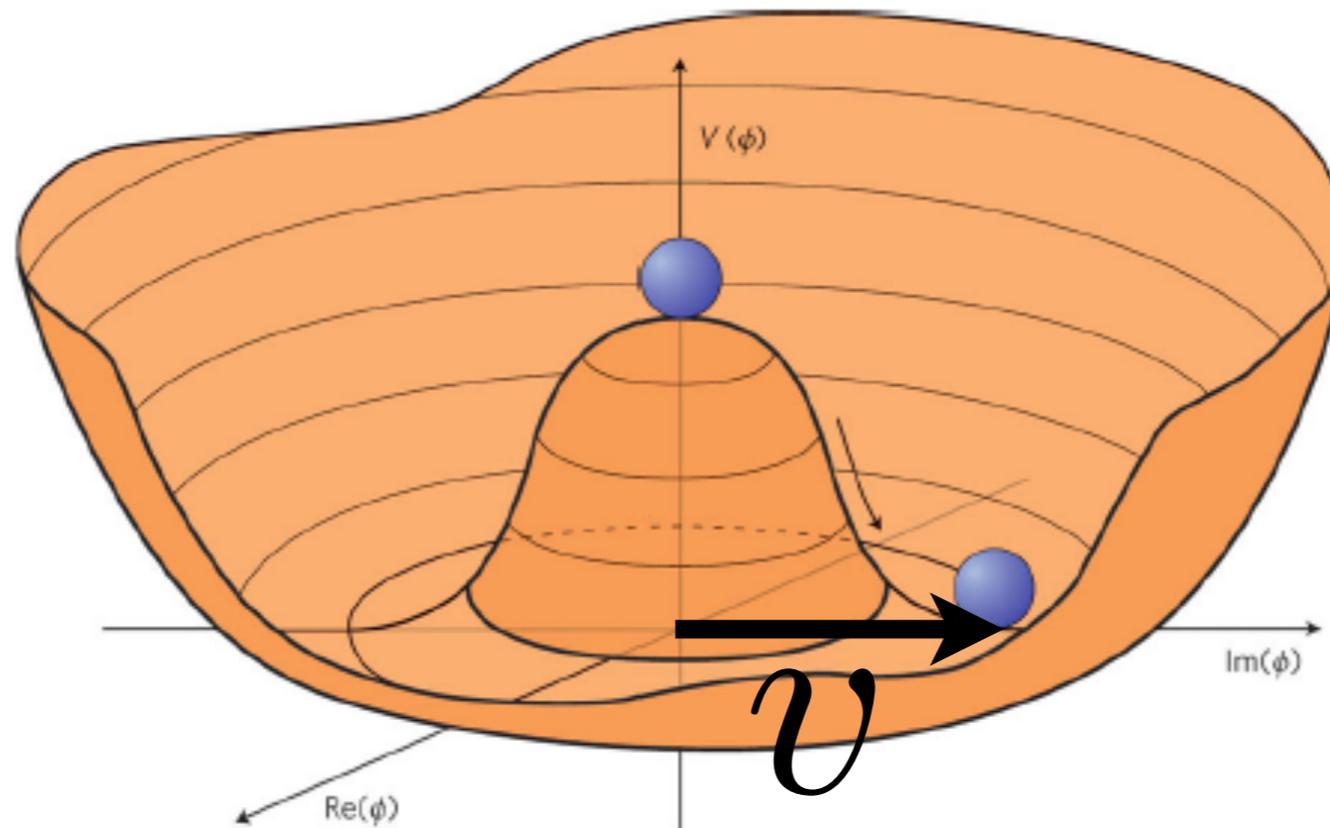
このように、対称性が自発的に破れている場合、重要なのは、粒子を生成、消滅する機械が**原点からずれている**ことです。

ヒッグスの内部空間



このように、対称性が自発的に破れている場合、重要なのは、粒子を生成、消滅する機械が**原点からずれている**ことです。

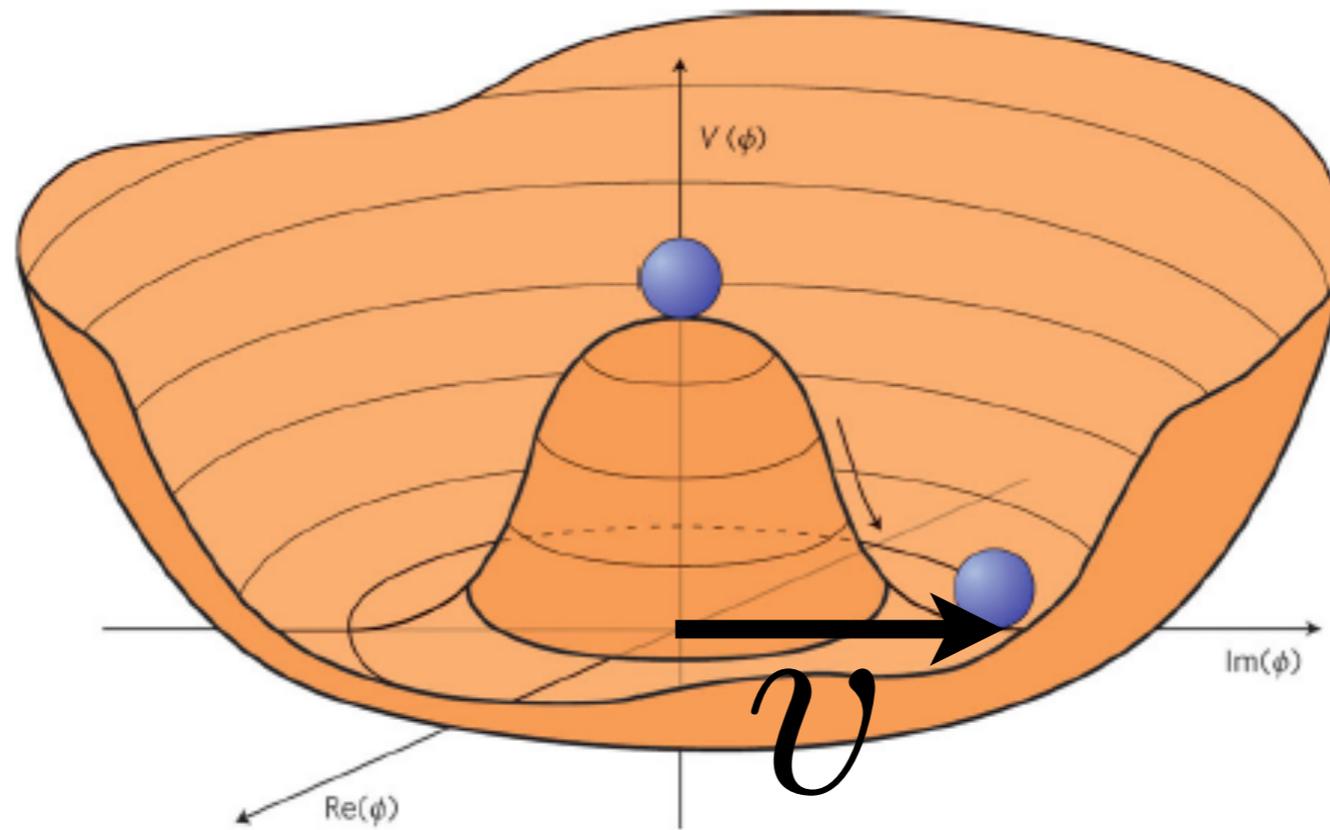
ヒッグスの内部空間



このように、対称性が自発的に破れている場合、重要なのは、粒子を生成、消滅する機械が**原点からずれている**ことです。

このずれ (v) を、**真空期待値**と呼んだりします。

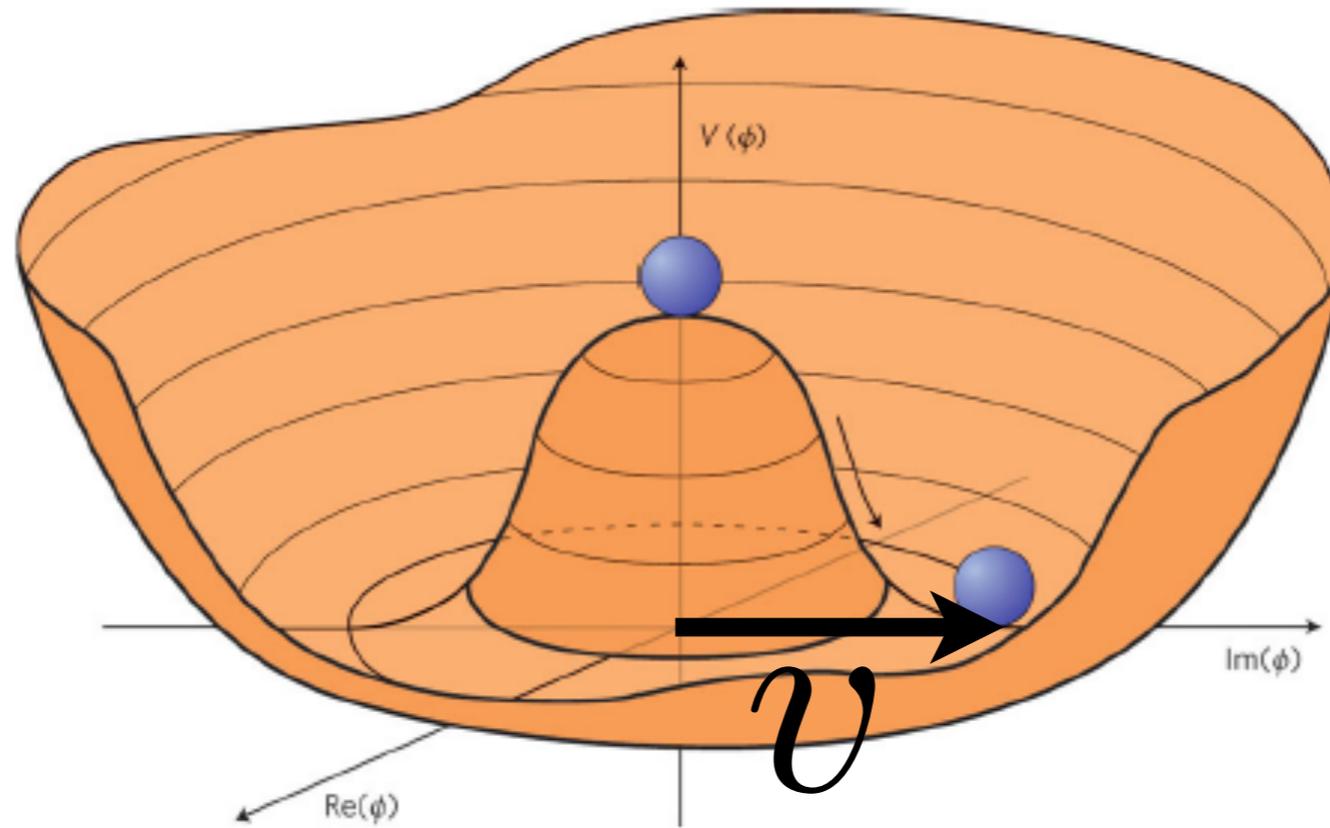
ヒッグスの内部空間



ということで、先ほどのラグランジアンで
 Φ と書かれていたヒッグスは、

$$\Phi = v + \text{●} \quad \text{となります}$$

ヒッグスの内部空間

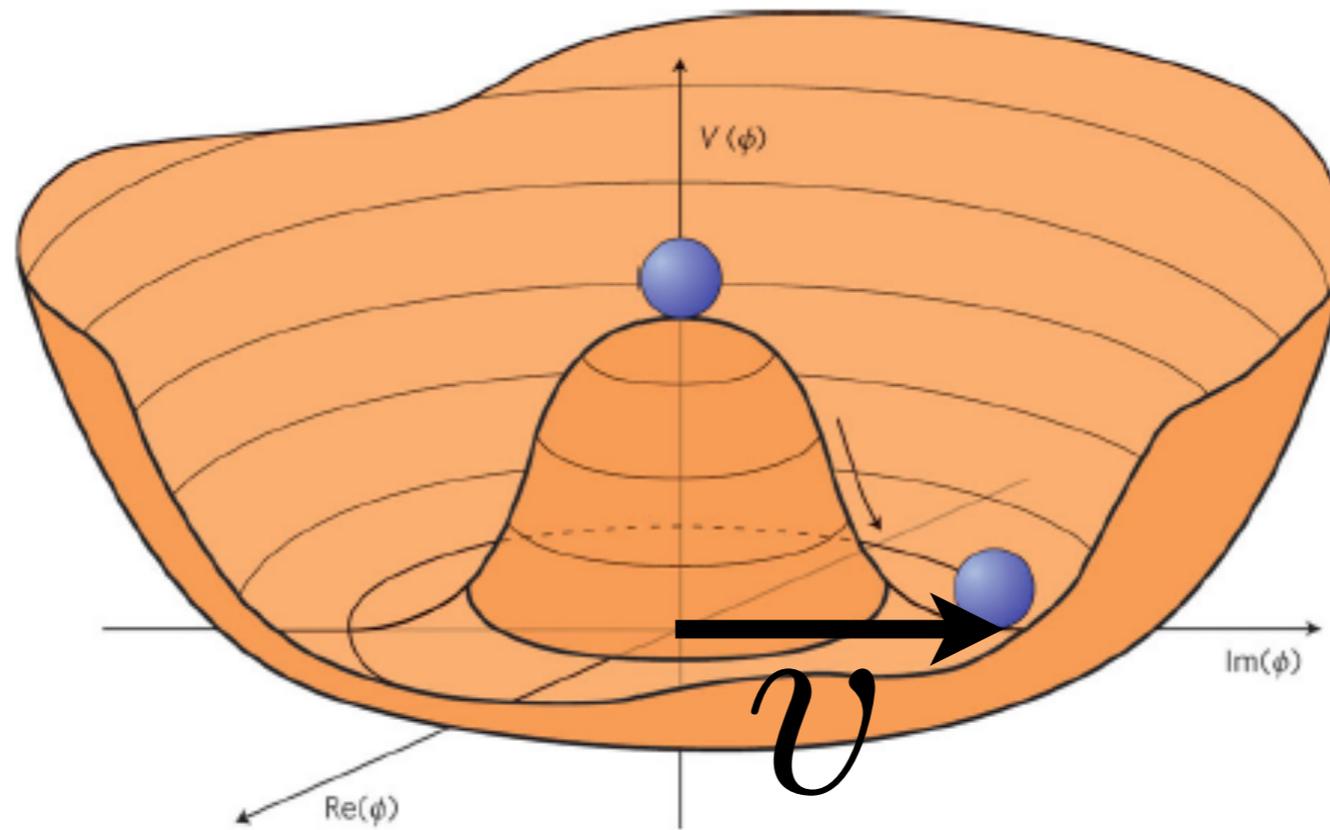


ということで、先ほどのラグランジアンで
 Φ と書かれていたヒッグスは、

$$\Phi = v + \text{●} \quad \text{となります}$$

これはただの数値で、

ヒッグスの内部空間



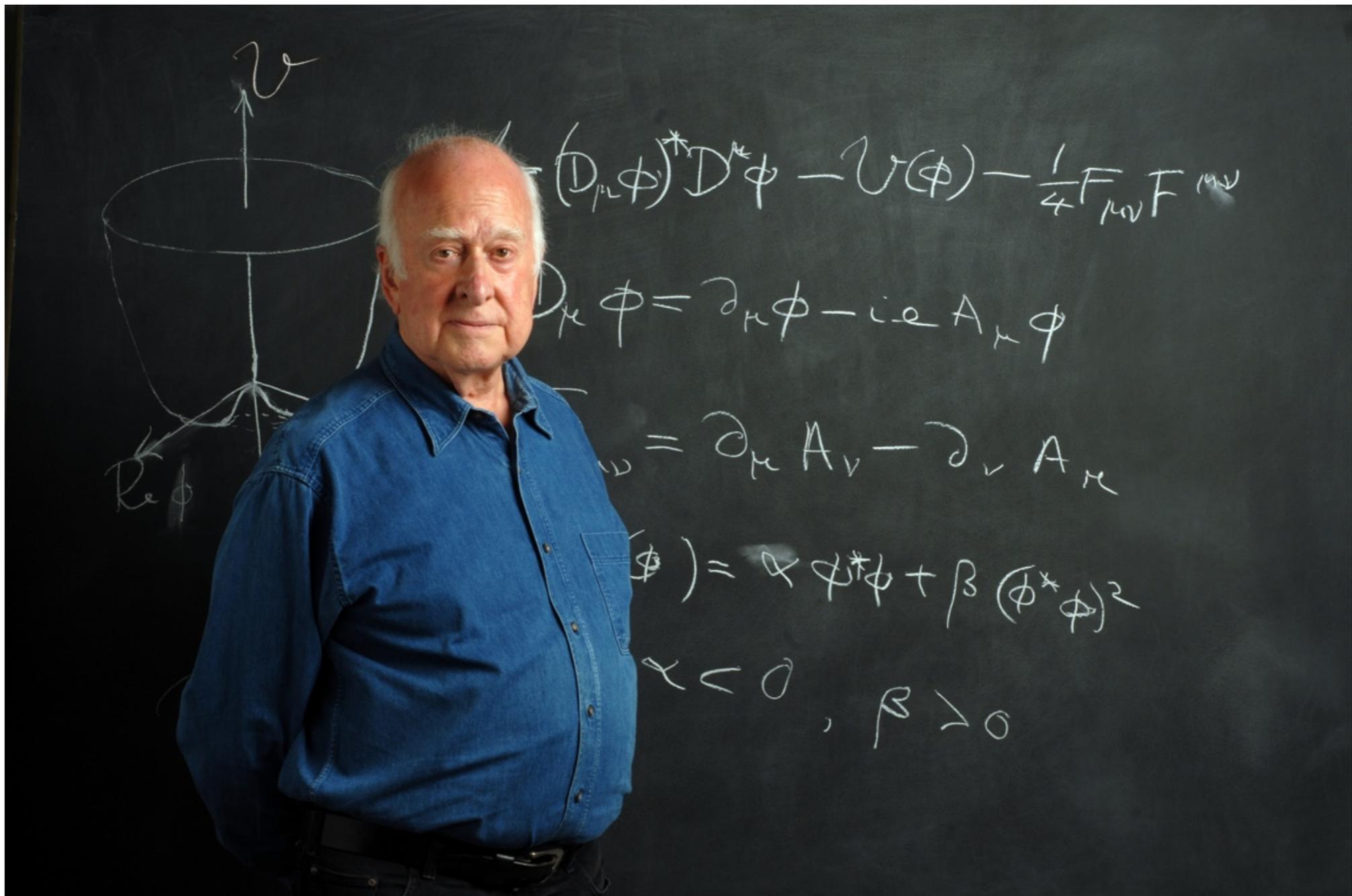
ということで、先ほどのラグランジアンで
 Φ と書かれていたヒッグスは、

$$\Phi = v \pm \text{●} \quad \text{となります}$$

これはヒッグス粒子を作ったり消したりする機械です

$$\Phi = v + \bullet$$

さて、もういちどこの黒板に書かれたラグランジアンをよく見直してみると、、、



$$\Phi = \psi + \bullet$$

さて、もういちどこの黒板に
書かれたラグランジアン
をよく見直してみると、、、

こういう項があります $e^2 \phi^* \phi A_\mu A^\mu$

$$\Phi = \psi + \text{●}$$

さて、もういちどこの黒板に書かれたラグランジアンをよく見直してみると、、、

こういう項があります $e^2 \phi^* \phi A_\mu A^\mu$

これはタダの数値です

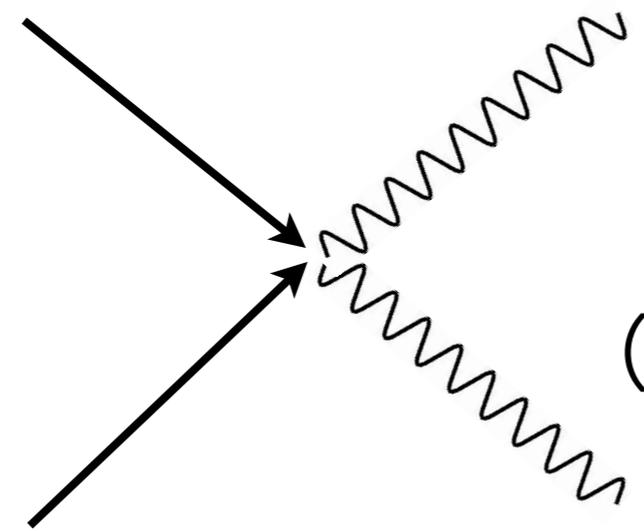
$$\Phi = \psi + \text{●}$$

さて、もういちどこの黒板に書かれたラグランジアンをよく見直してみると、、、

こういう項があります $e^2 \phi^* \phi A_\mu A^\mu$

||

もしこれがなければ、 $e^2 \text{●} \text{●} A_\mu A^\mu$ なので、



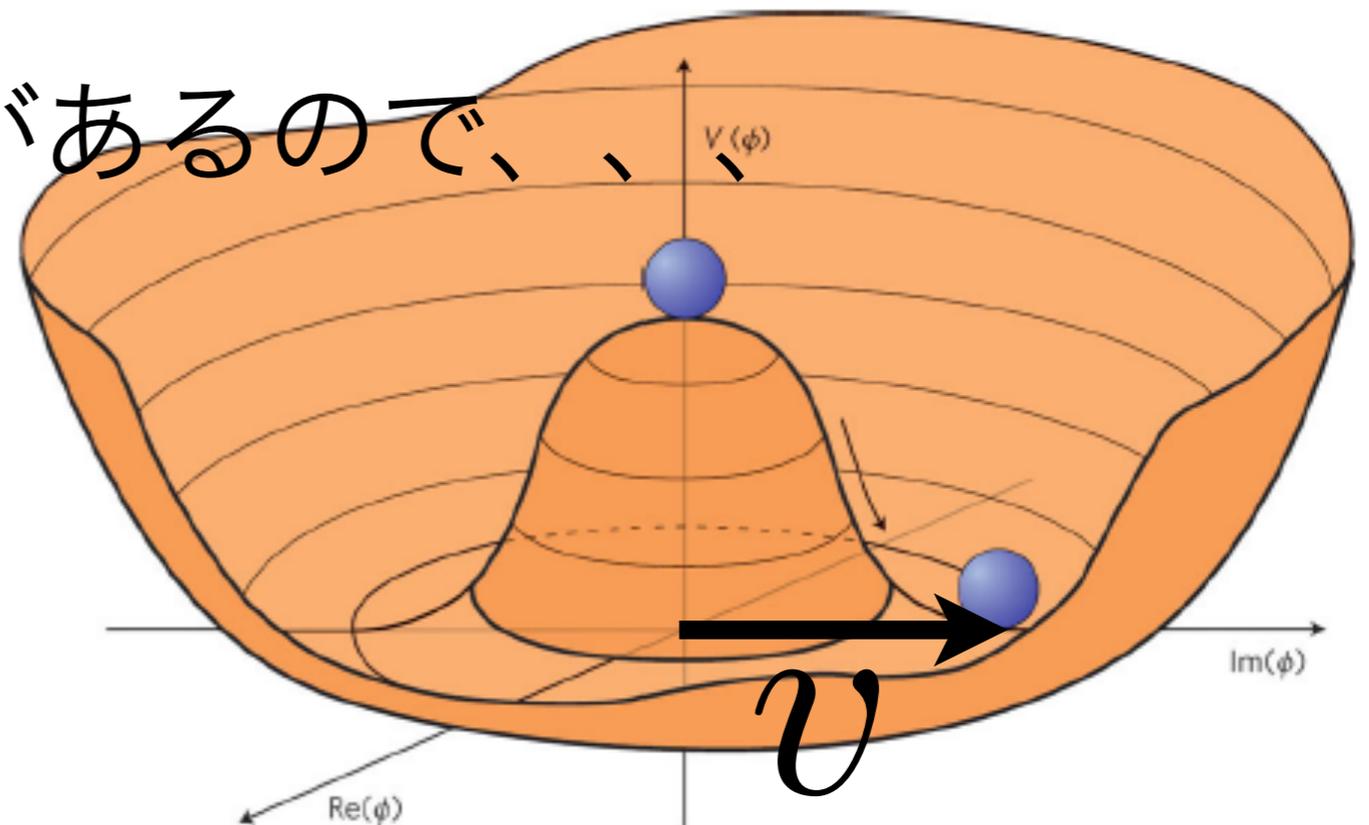
相互作用にしかない
(ゲージ粒子の質量項にはならない)

$$\phi = \nu + \text{●}$$

さて、もういちどこの黒板に書かれたラグランジアンをよく見直してみると、、、

こういう項があります $e^2 \phi^* \phi A_\mu A^\mu$

しかしいま、 ν があるので、、、



$$\Phi = \mathcal{V} + \bullet$$

さて、もういちどこの黒板に書かれたラグランジアンをよく見直してみると、、、

こういう項があります $e^2 \phi^* \phi A_\mu A^\mu$

$\Phi = \mathcal{V} + \bullet$ をつかってこれを書き直すと、、、

$$e^2 v^2 A_\mu A^\mu + 2 e^2 v \bullet A_\mu A^\mu + e^2 \bullet \bullet A_\mu A^\mu$$

となります。

$$\Phi = \mathcal{V} + \bullet$$

さて、もういちどこの黒板に
書かれたラグランジアン
をよく見直してみると、、、

こういう項があります $e^2 \phi^* \phi A_\mu A^\mu$

$\Phi = \mathcal{V} + \bullet$ をつかって
これを書き直すと、、、

$$e^2 v^2 A_\mu A^\mu + 2 e^2 v \bullet A_\mu A^\mu + e^2 \bullet \bullet A_\mu A^\mu$$

ん?!?!?!

$$\Phi = \mathcal{V} + \bullet$$

さて、もういちどこの黒板に書かれたラグランジアンをよく見直してみると、、、

こういう項があります $e^2 \phi^* \phi A_\mu A^\mu$

$\Phi = \mathcal{V} + \bullet$ をつかってこれを書き直すと、、、

$e^2 v^2 A_\mu A^\mu$ というのがでてきます。

$$\Phi = \mathcal{V} + \text{●}$$

さて、もういちどこの黒板に書かれたラグランジアンをよく見直してみると、、、

こういう項があります $e^2 \phi^* \phi A_\mu A^\mu$

$\Phi = \mathcal{V} + \text{●}$ をつかってこれを書き直すと、、、

$e^2 v^2 A_\mu A^\mu$ というのがでてきます。

↑
これらはタダの数値です

$$\Phi = \mathcal{V} + \text{●}$$

さて、もういちどこの黒板に書かれたラグランジアンをよく見直してみると、、、

こういう項があります $e^2 \phi^* \phi A_\mu A^\mu$

$\Phi = \mathcal{V} + \text{●}$ をつかってこれを書き直すと、、、

$e^2 v^2 A_\mu A^\mu$ というのがでてきます。

↑ ↗
これらはタダの数値です

質量項 (一時停止の命令)
の形をしています!!!!

$$\Phi = \mathcal{V} + \bullet$$

さて、もういちどこの黒板に書かれたラグランジアンをよく見直してみると、、、

こういう項があります $e^2 \phi^* \phi A_\mu A^\mu$

$\Phi = \mathcal{V} + \bullet$ をつかってこれを書き直すと、、、

$e^2 v^2 A_\mu A^\mu$ というのがでてきます。

ゲージ対称性を持つラグランジアンから出発して、ゲージ粒子に質量を持たせることができた！！！！

$$\Phi = \nu + \bullet$$

さて、もういちどこの黒板に書かれたラグランジアンをよく見直してみると、、、

こういう項があります $e^2 \phi^* \phi A_\mu A^\mu$

$\Phi = \nu + \bullet$ をつかってこれを書き直すと、、、

$e^2 \nu^2 A_\mu A^\mu$ というのがでてきます。

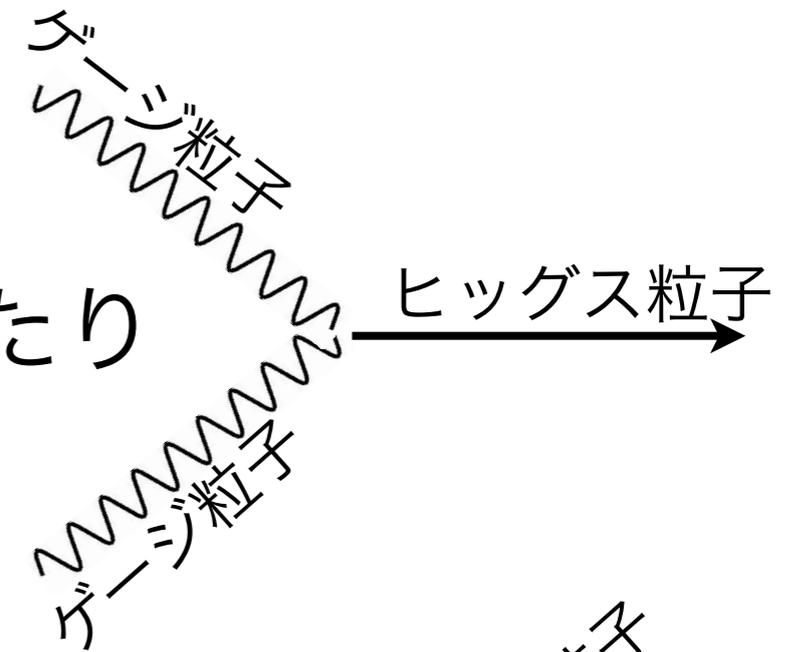
これがヒッグス機構です！！！！！！

ちなみに、、、さっきこういう項もありました。

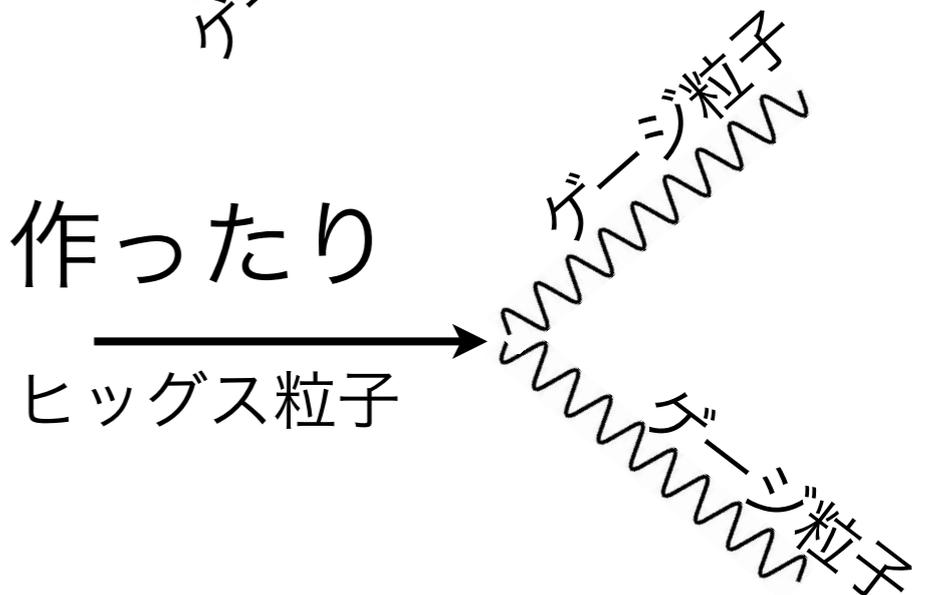
$$+ 2 e^2 v \text{ (blue sphere) } A_\mu A^\mu$$

これは、

ゲージ粒子二つからヒッグス粒子を作ったり



ヒッグス粒子から二つのゲージ粒子を作ったり



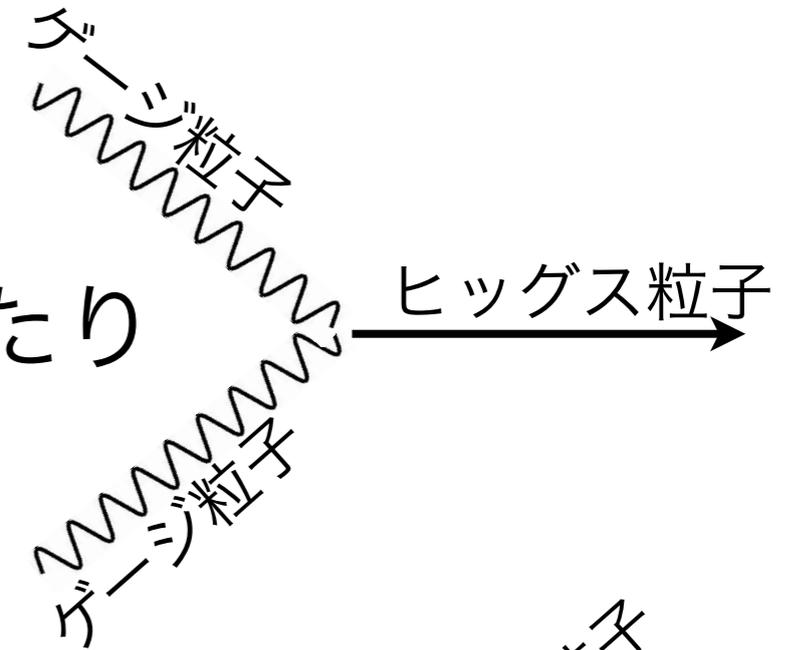
する命令になります。

ちなみに、、、さっきこういう項もありました。

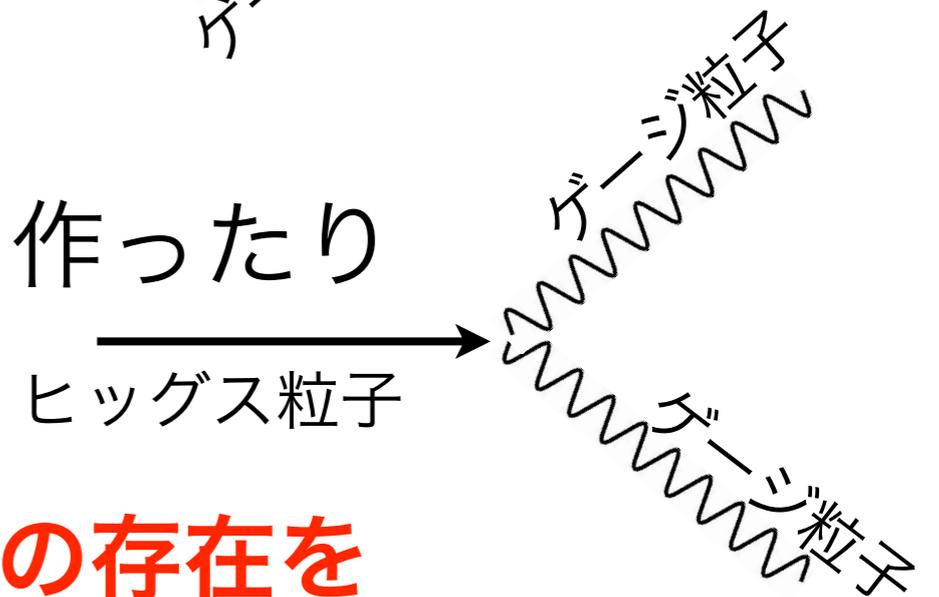
$$+ 2 e^2 v \text{ (blue sphere) } A_\mu A^\mu$$

これは、

ゲージ粒子二つからヒッグス粒子を作ったり



ヒッグス粒子から二つのゲージ粒子を作ったり



する命令になります。

**ヒッグス粒子の存在を
実験で検証するのに
重要な役割を果たします**

これまで、ゲージ粒子の質量の話をしてきましたが、最後に物質粒子（電子とか）の質量の話をしてします。

これまで、ゲージ粒子の質量の話をしてきましたが、最後に物質粒子（電子とか）の質量の話をします。

じつは、、、標準模型では、物質粒子もゲージ対称性を要請すると質量項（一時停止の命令）が書けません。

これまで、ゲージ粒子の質量の話をしてきましたが、最後に物質粒子（電子とか）の質量の話をします。

じつは、、、標準模型では、物質粒子もゲージ対称性を要請すると質量項（一時停止の命令）が書けません。

物質粒子の質量項は、 $m \bar{\psi} \psi$



これはタダの数値です

これまで、ゲージ粒子の質量の話をしてきましたが、最後に物質粒子（電子とか）の質量の話をします。

じつは、、、標準模型では、物質粒子もゲージ対称性を要請すると質量項（一時停止の命令）が書けません。

物質粒子の質量項は、 $m \bar{\psi} \psi$



これはタダの数値です

と書けますが、これはゲージ対称性を要請すると存在してはならない命令なのです。

しかし、物質粒子は質量を持っていることがわかっている
るので、これでは困ります。

しかし、物質粒子は質量を持っていることがわかって
いるので、これでは困ります。

先ほどゲージ粒子に質量を与えるためにヒッグスを導
入したように、今度は物質粒子に質量を与えるために
ヒッグスのようなものを新たに導入しなければいけな
いのでしょうか。。。。

しかし、物質粒子は質量を持っていることがわかって
いるので、これでは困ります。

先ほどゲージ粒子に質量を与えるためにヒッグスを導
入したように、今度は物質粒子に質量を与えるために
ヒッグスのようなものを新たに導入しなければいけな
いのでしょうか。。。。

新しい粒子をどんどん模型に加えて行くのはあまり気
が進みません。。。。

いや、じつは！！！！さっきゲージ粒子の質量の起源となったヒッグスは、物質粒子の質量の起源にもなっています！

いや、じつは！！！！さっきゲージ粒子の質量の起源となったヒッグスは、物質粒子の質量の起源にもなっています！

これもみなさん、すでに目にしているかもしれませんが。

いや、じつは！！！！さっきゲージ粒子の質量の起源となったヒッグスは、物質粒子の質量の起源にもなっています！

これもみなさん、すでに目にしているかもしれません。

これです

ノーベル賞緊急講演会
ヒッグス粒子の正体に迫る！

日時：10月17日(木) 17時～19時
場所：理学南館 坂田・平田ホール
対象：一般、学生（申込不要）

受賞理由の鍵となった「ヒッグス粒子」に関する一般的な解説に加え、名古屋大学における理論的・実験的「ヒッグス」研究を紹介する講演会です。

- 「ヒッグス機構とヒッグス粒子」
倉知昌史（素粒子宇宙起源研究機構基礎理論研究センター）
- 「ヒッグス粒子の発見とさらなる新粒子を求めて」
戸本誠（素粒子宇宙起源研究機構現象解析研究センター）
- 「ヒッグス発見の向こうに —大規模数値計算で探る新法則—」
青木保道（素粒子宇宙起源研究機構基礎理論研究センター）

名古屋大学 NAGOYA UNIVERSITY KMI 主催 素粒子宇宙起源研究機構

こんな感じになってます $y \bar{\psi} \psi \phi$

こんな感じになっています $y \bar{\psi} \psi \phi$



これはタダの数値です

こんな感じになっています

$$y \bar{\psi} \psi \phi$$



これはゲージ対称性を要請しても
存在できる項（命令）です。

こんな感じになっています

$$y \bar{\psi} \psi \phi$$

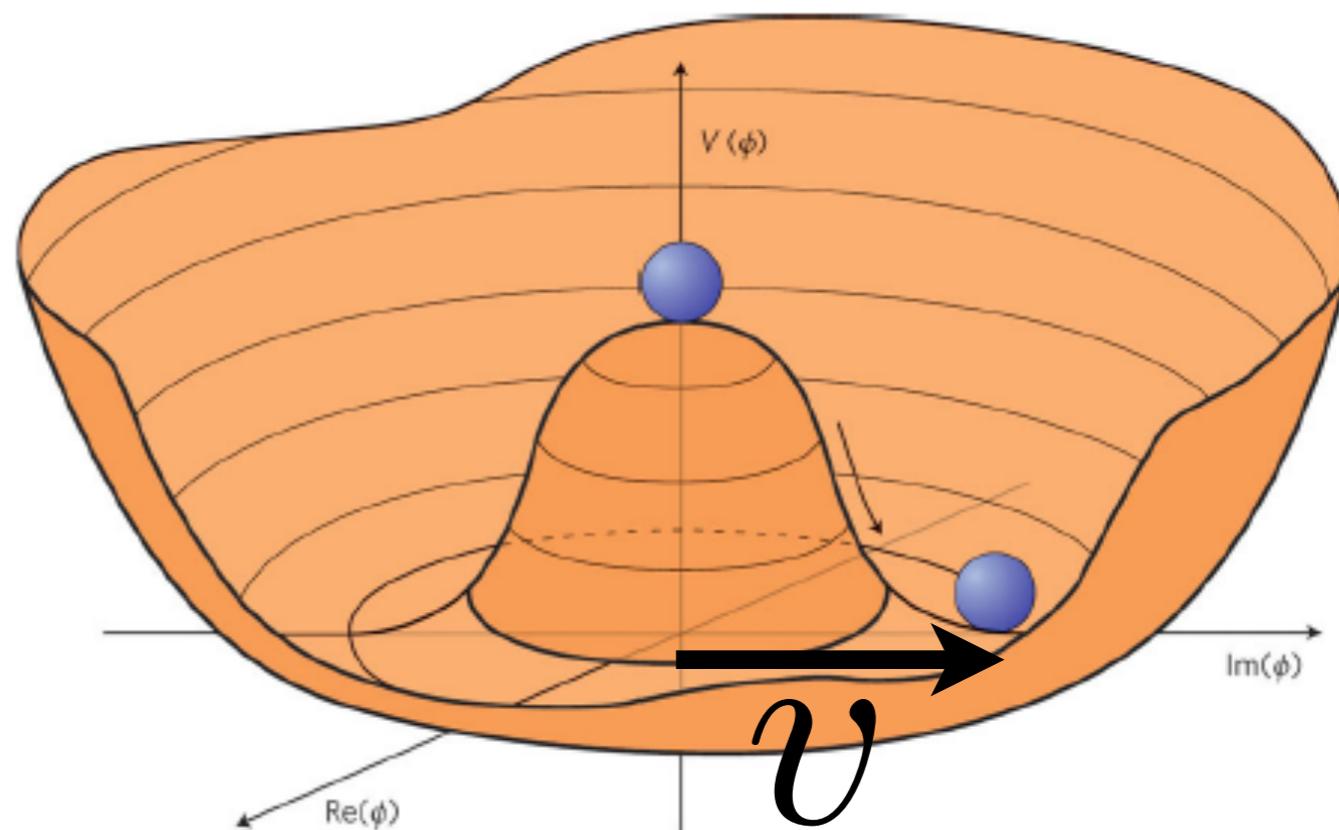


これはゲージ対称性を要請しても
存在できる項（命令）です。

ここに、さきほどのヒッグスの
対称性の自発的破れを持ってきます。

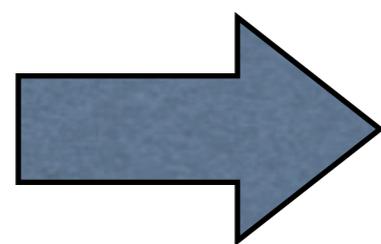
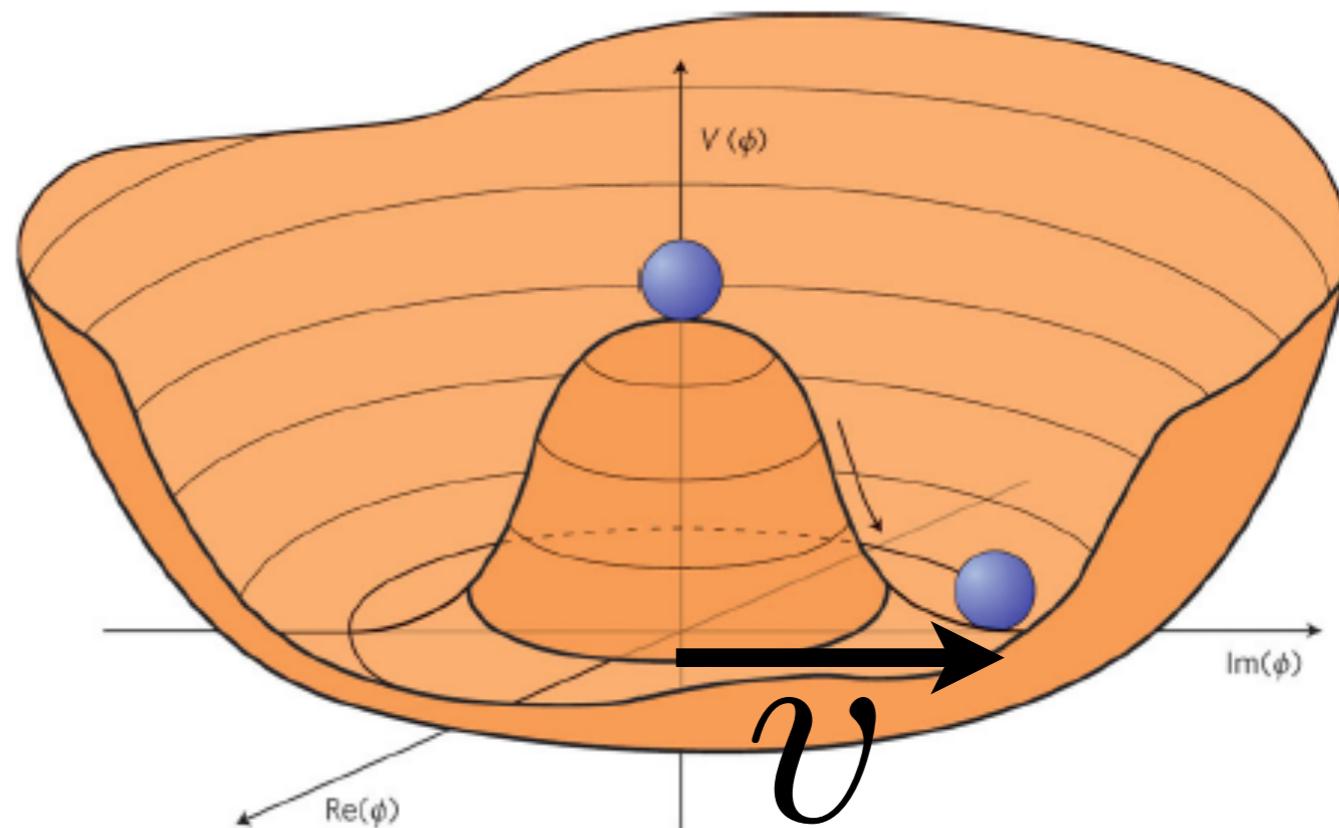
こんな感じになってます $y \bar{\psi} \psi \phi$

$$\phi = v + \text{●}$$



こんな感じになってます $y \bar{\psi} \psi \phi$

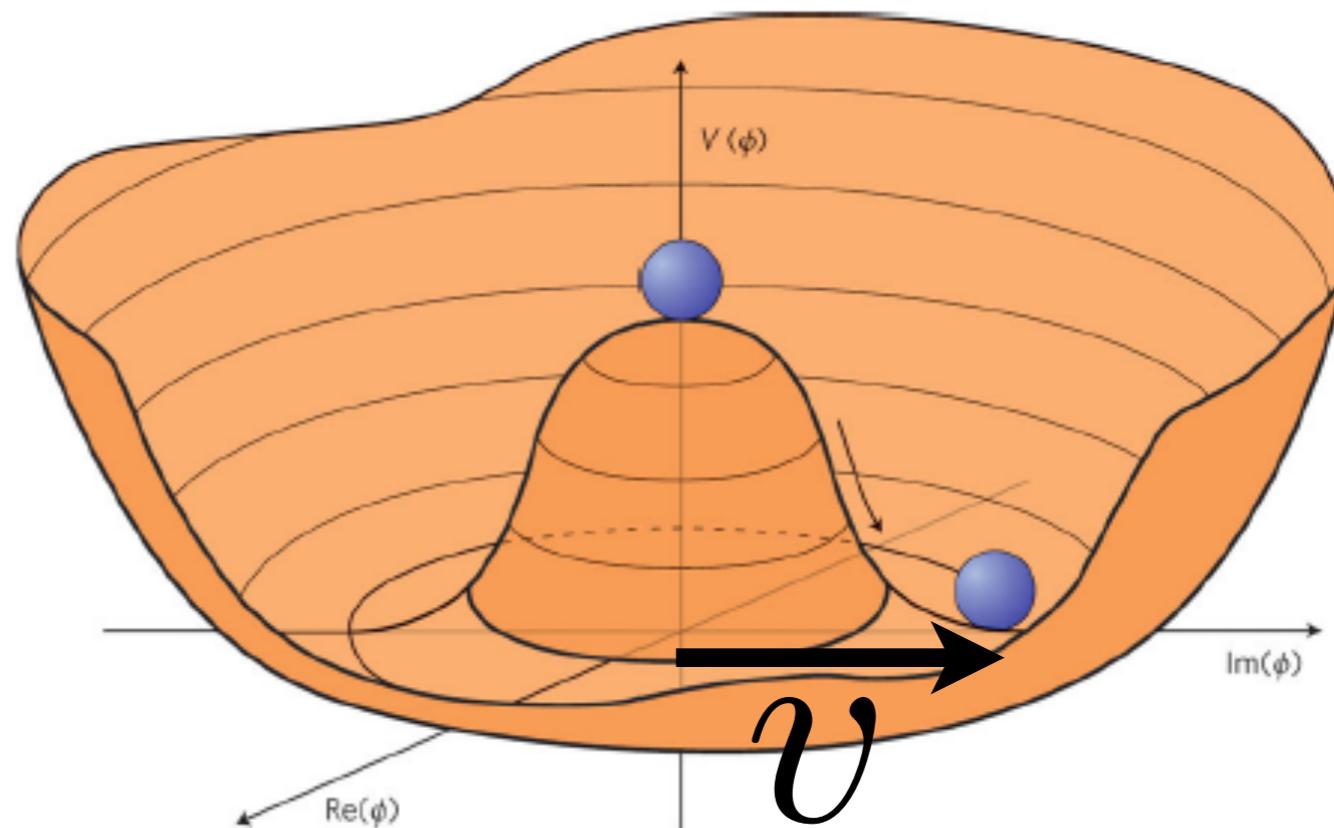
$$\phi = v + \text{●}$$



$$y \bar{\psi} \psi v + y \bar{\psi} \psi \text{●}$$

こんな感じになってます $y \bar{\psi} \psi \phi$

$$\phi = v + \text{●}$$

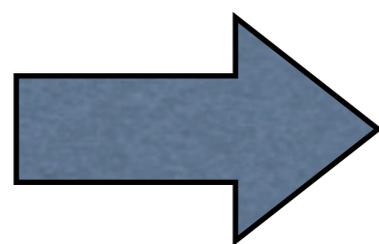
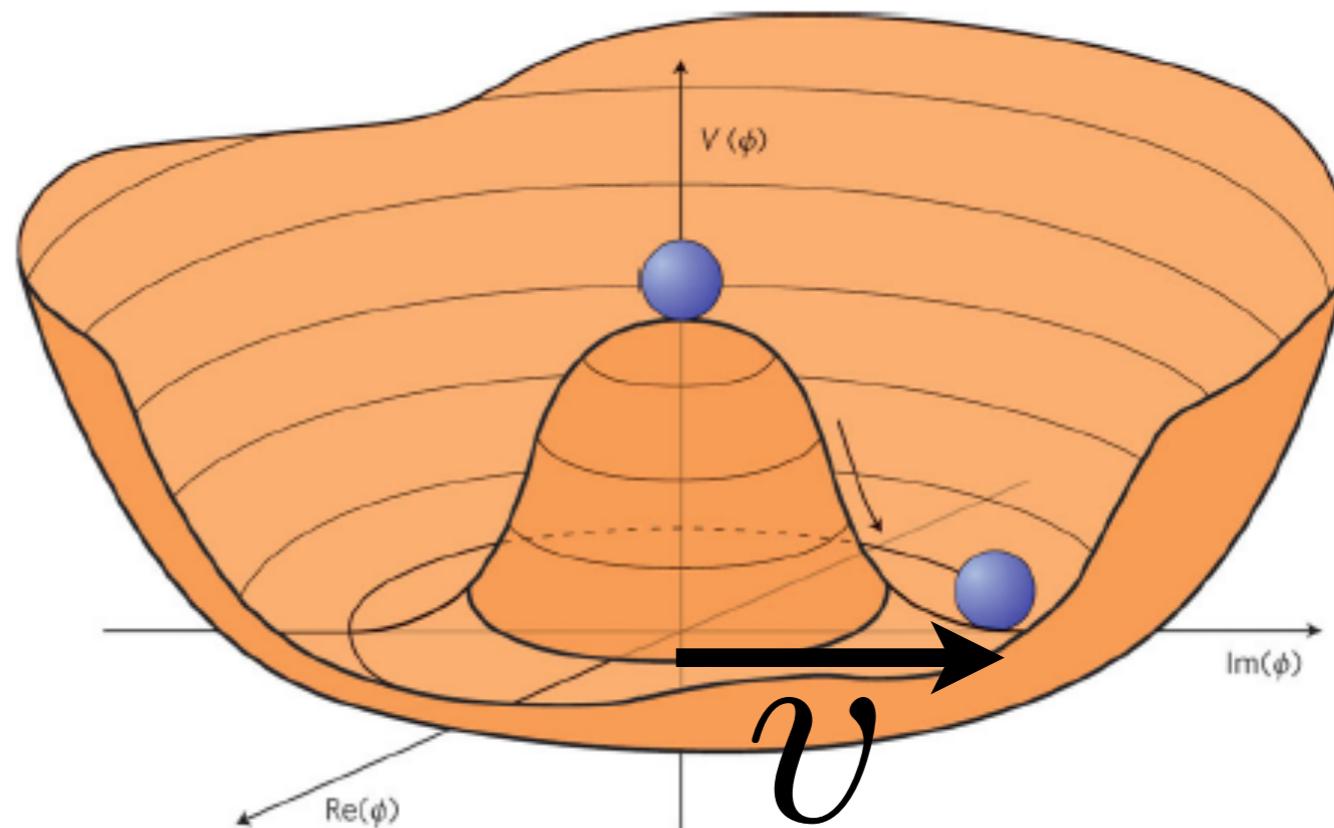


➔ $y \bar{\psi} \psi v + y \bar{\psi} \psi \text{●}$

↑
物質粒子の質量項が出てきた！

こんな感じになってます $y \bar{\psi} \psi \phi$

$$\phi = v + \text{●}$$

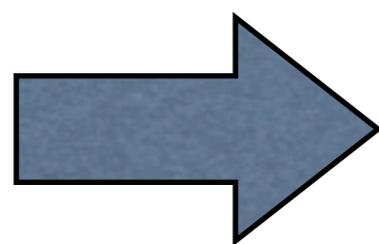
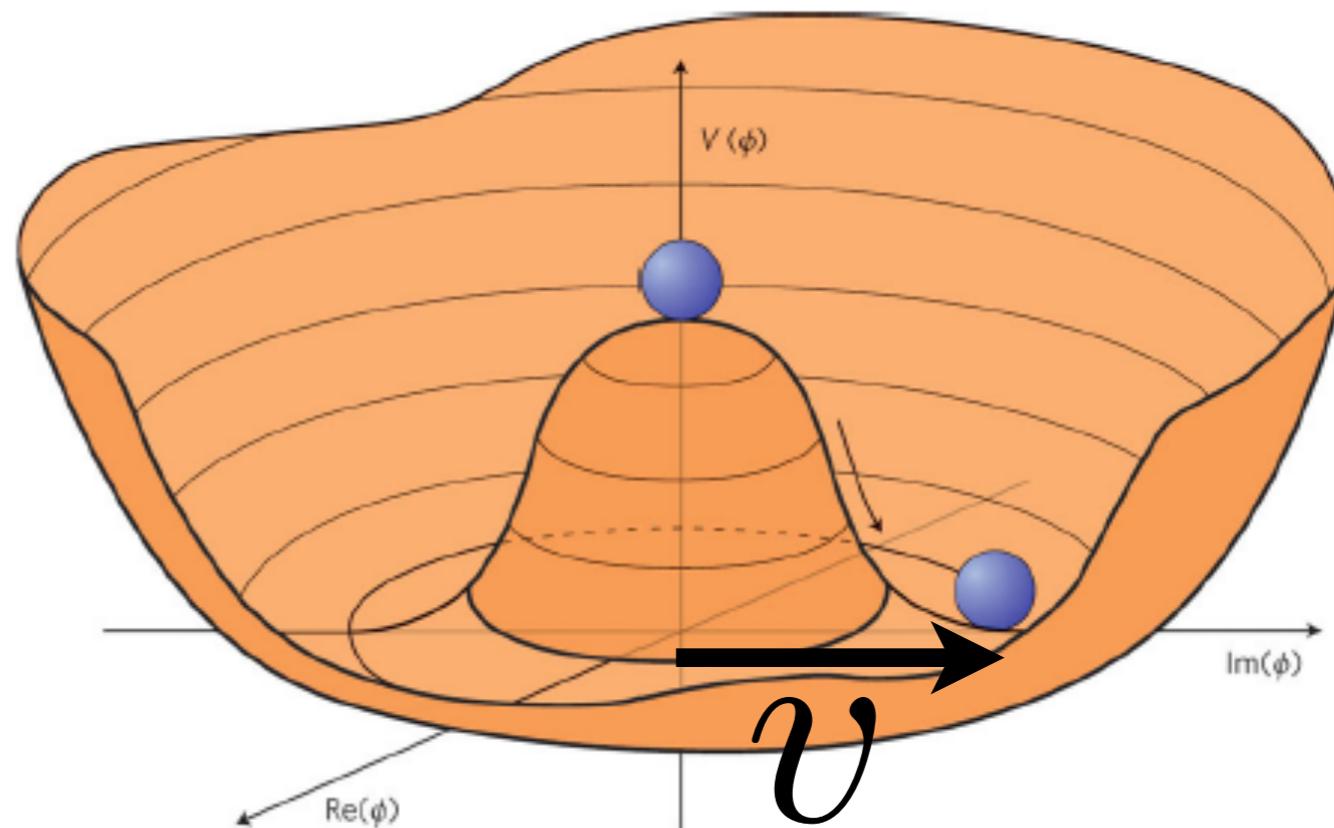


$$y \bar{\psi} \psi v + y \bar{\psi} \psi \text{●}$$

こちらは物質粒子
とヒッグス粒子の
相互作用項

こんな感じになってます $y \bar{\psi} \psi \phi$

$$\phi = v + \text{●}$$



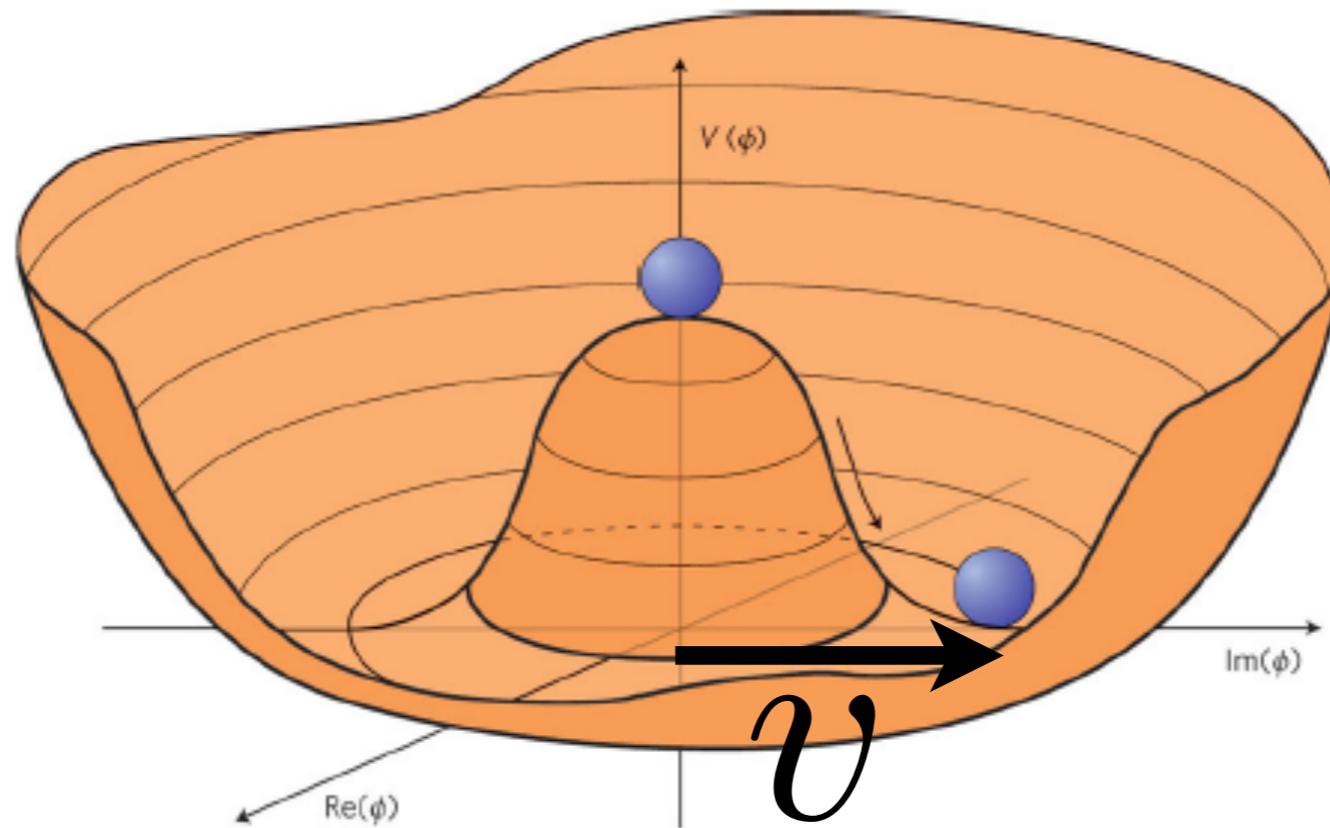
$$y \bar{\psi} \psi v + y \bar{\psi} \psi \text{●}$$

こちらは物質粒子
とヒッグス粒子の
相互作用項

やはりヒッグス粒子の存在を
実験で検証するのに
重要な役割を果たします

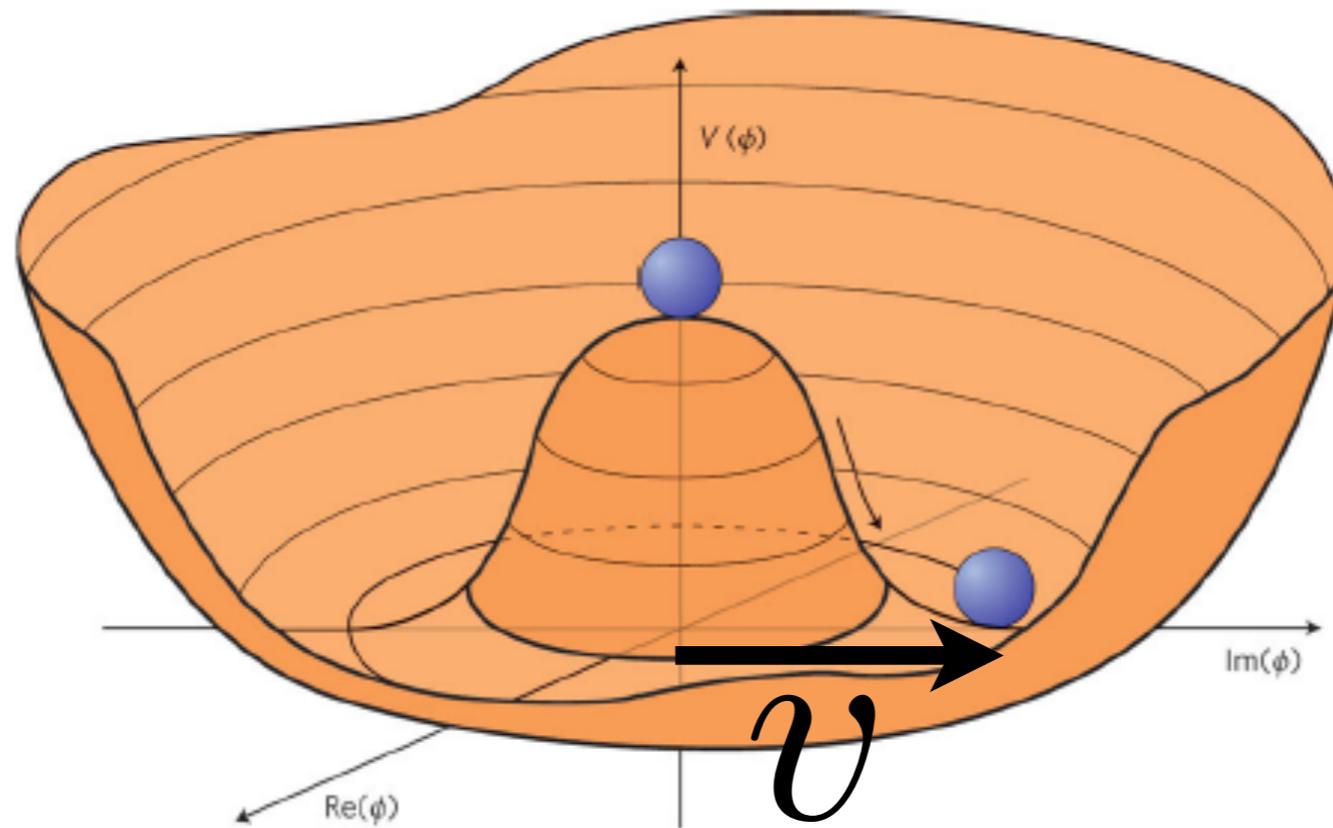
ということで、
説明したかったことは
これですべてです。

もう一度強調しておきたいことは、この絵の中に



二つの異なる概念が共存しているということです。

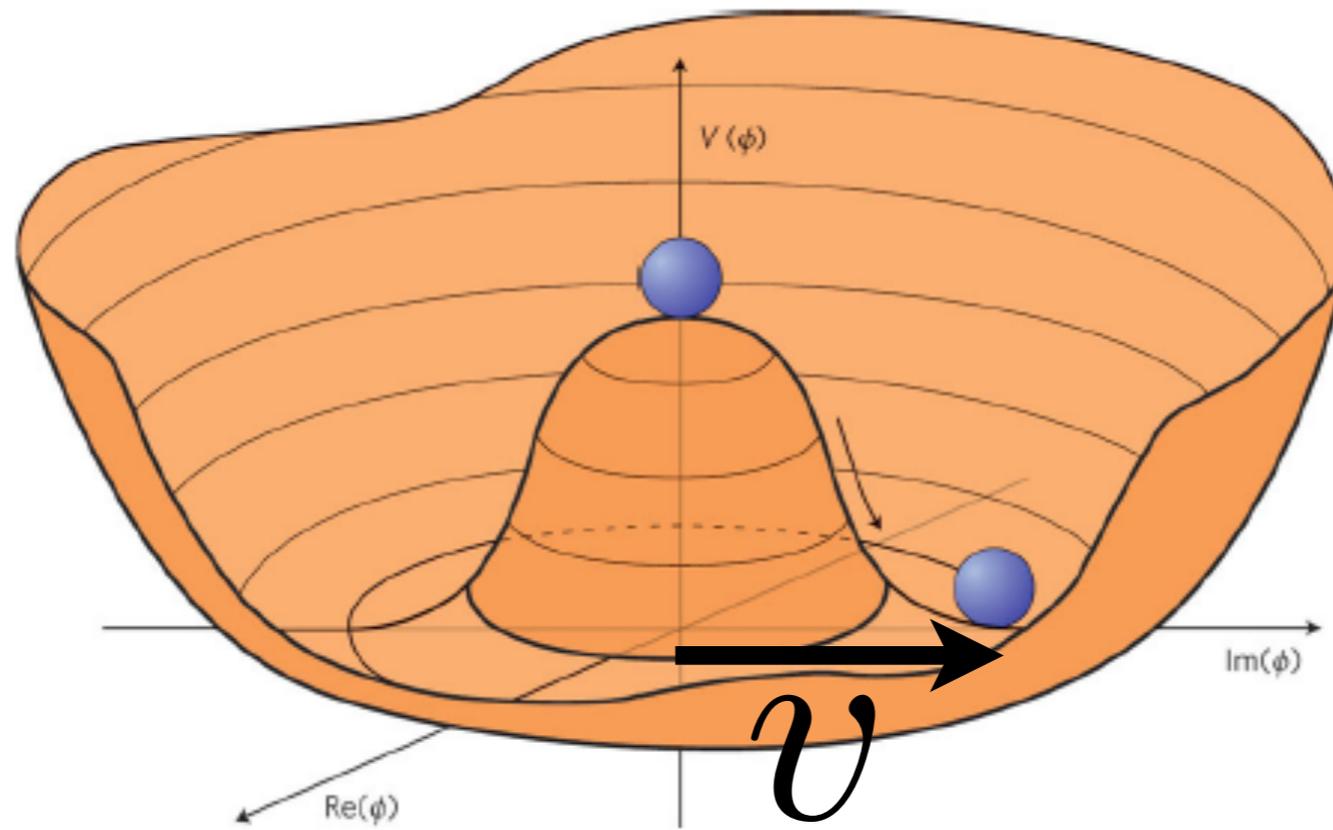
もう一度強調しておきたいことは、この絵の中に



二つの異なる概念が共存しているということです。

一つは、 U の存在です。質量の起源になります。

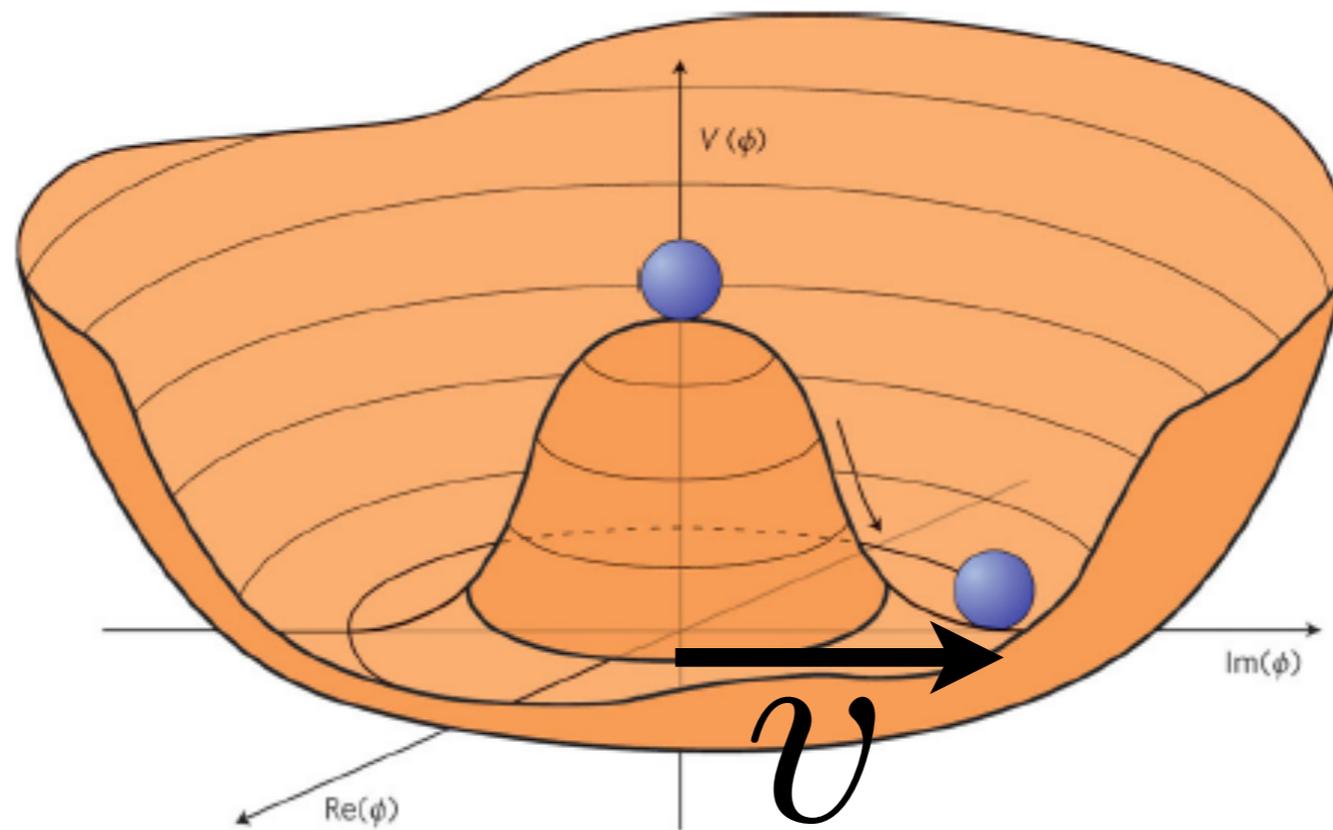
もう一度強調しておきたいことは、この絵の中に



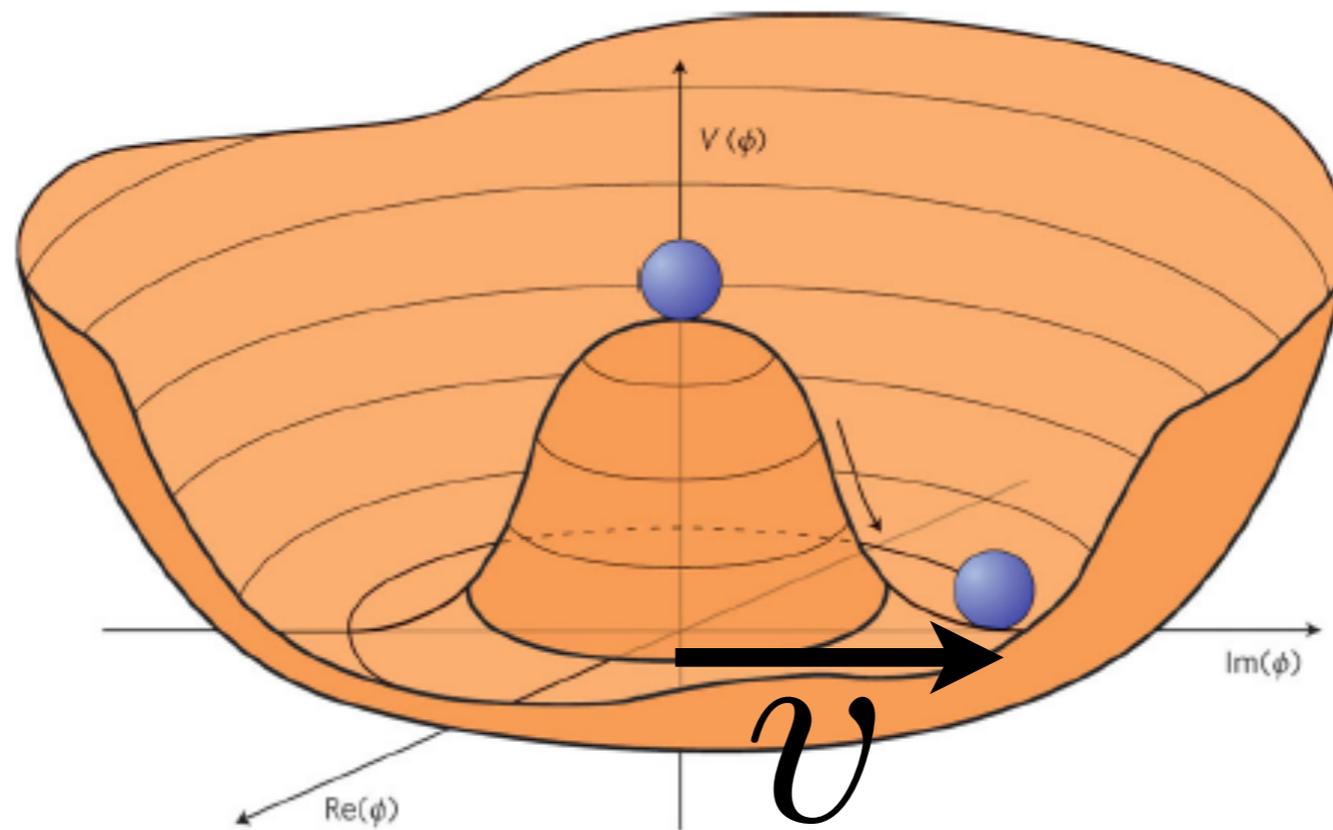
二つの異なる概念が共存しているということです。

一つは、 \mathcal{U} の存在です。**質量の起源**になります。

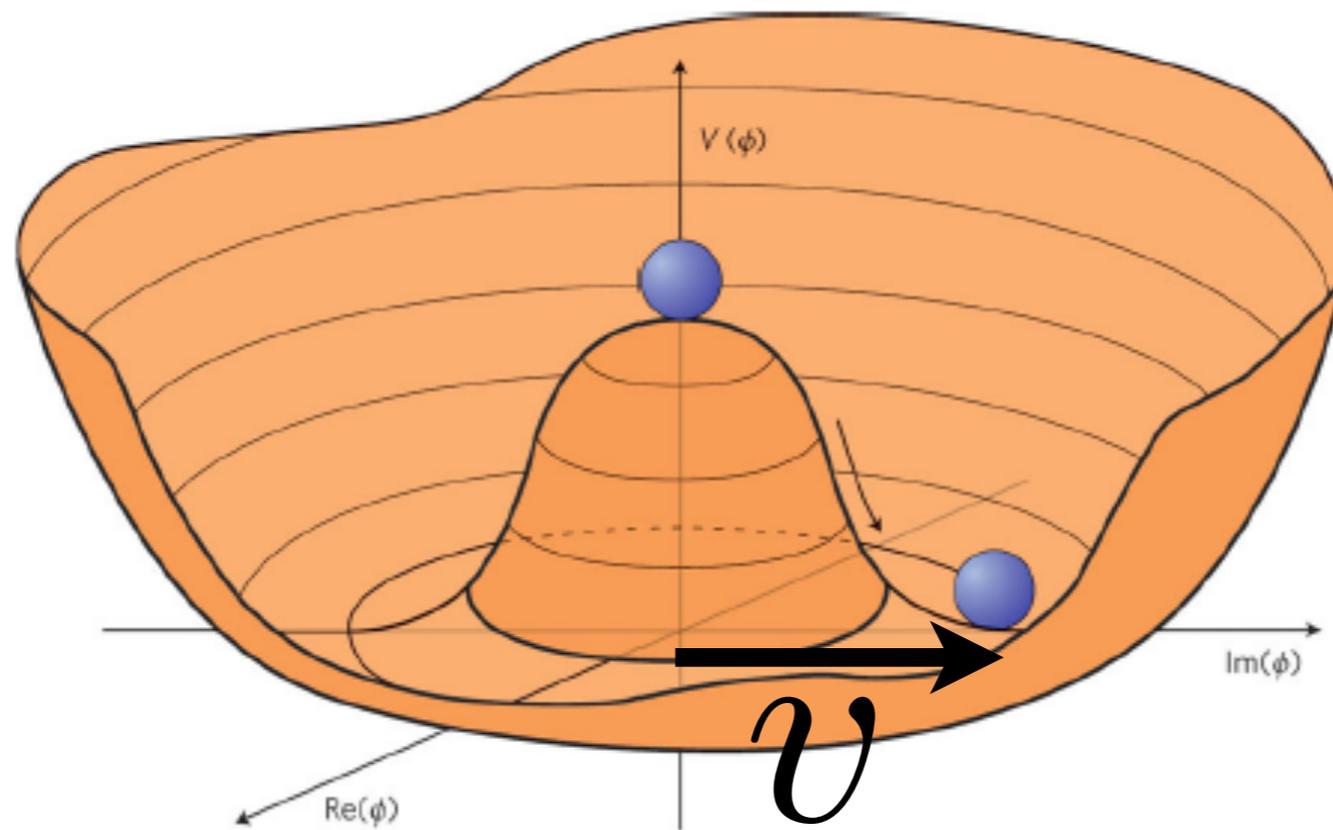
もう一つは、 の存在です。**ヒッグス粒子の存在**を意味します。



U は、素粒子の質量を説明するために存在しなければいけないことはわかっていました。



しかし、ヒッグス粒子 \bullet は、 \mathcal{U} に付随して出てきたものであって、素粒子の質量を説明するためには必ずしも存在しなくてもよかったです。



存在して当たり前前のものを予言したのではなく、別に存在しなくても良いものを、存在すると予言して、それが実際にあることが実験でたしかめられたのだから、それはやっぱりすごいことですよね。

最後に。。。。

これは一番最初のスライドに使った絵です



ヒッグス粒子 (H) が見つかって、ついに
パズルが完成したことを表しています



素粒子標準模型という名のパズルです



しかしこれで終わりではありません



背景をよく見てください



今完成させたパズルは、巨大なパズルの
一つのピースにすぎないのです



我々は今、新しい時代を迎えようとしています



標準模型では説明できないことがたくさんあります



実験、理論、ともに本当に面白くなる時代です



実験、理論、ともに本当に面白くなる時代です

KMIのメンバーも、標準模型を超える物理を
探求して日々精進しています



そして今日この話を聞いてくれた人の中からも
この巨大なパズルに挑戦する人が
一人でも多く現れることを願っています

