



対称性が織りなす 素粒子の世界

広島大学先進理工系科学研究科 稲垣知宏

簡単な自己紹介

<https://home.hiroshima-u.ac.jp/inagaki/>

広島大学で

- 先進理工系科学研究科物理学プログラム、理工融合プログラム 教授
- 総合科学部 自然探究領域 数理情報科学授業科目群 教授
- 情報メディア教育研究センター 情報・データサイエンス教育研究部門 部門長
- AI・データイノベーション教育研究センター 教育部門 部門長
- 全学教育統括部企画運営会議 情報教育・データリテラシー部門 部門長

大学の外で

- 情報処理学会 情報処理教育委員会 委員長、一般情報教育委員会 委員、
情報処理学会 情報科教員・研修委員会 委員など
- 日本パグウォッシュ会議 代表

本日の目的

- 対称性とは何かを理解する
- 連続的対称性と離散的対称性の違いを説明できる
- 素粒子理論の構築に対称性が重要であることを学ぶ
- 素粒子理論の構築に対称性の破れが重要であることを学ぶ

対称性ってなんだ？

対称性とは

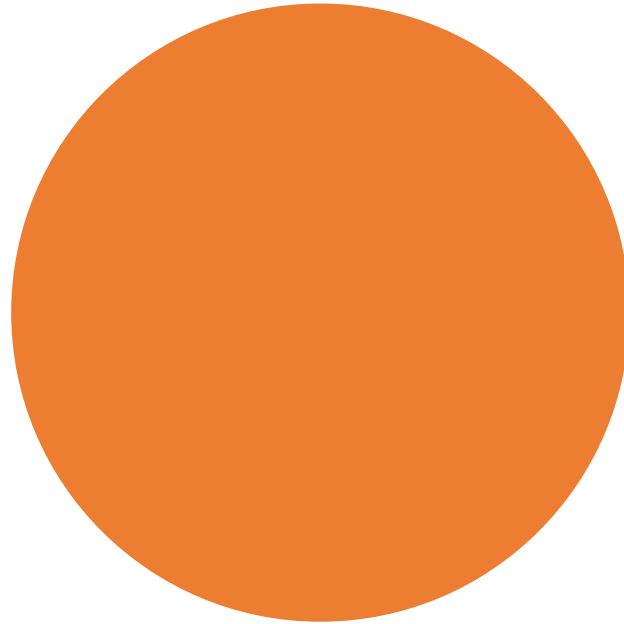
対称性：ある操作を施しても変わらない性質や構造
物理学で扱うのは、

- ある操作：場所、向き、時間などを変える
- 性質や構造：形、配置、法則など

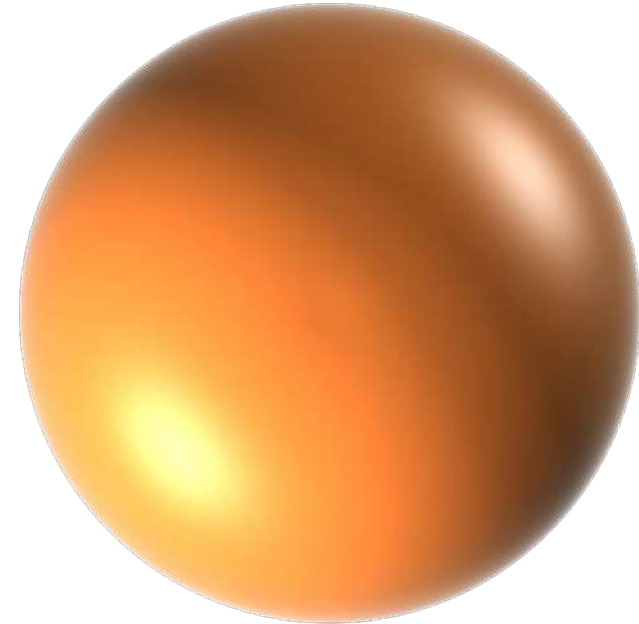
以下の図形が持つ対称性を考えよう！



正六角形



円

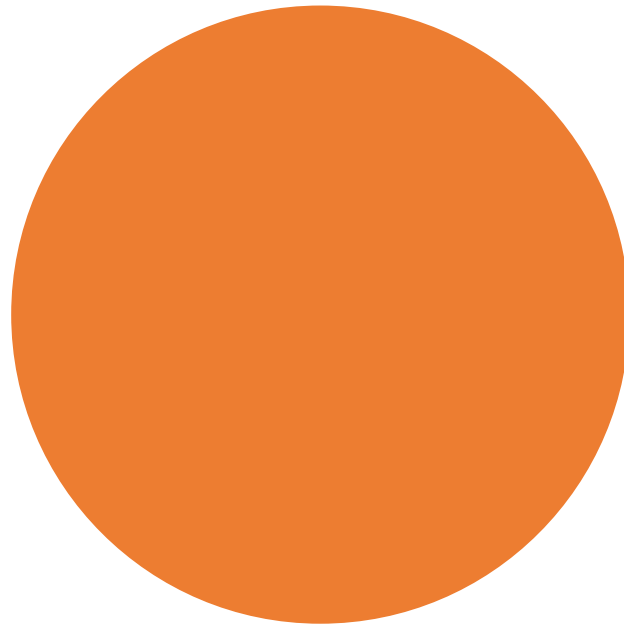


球

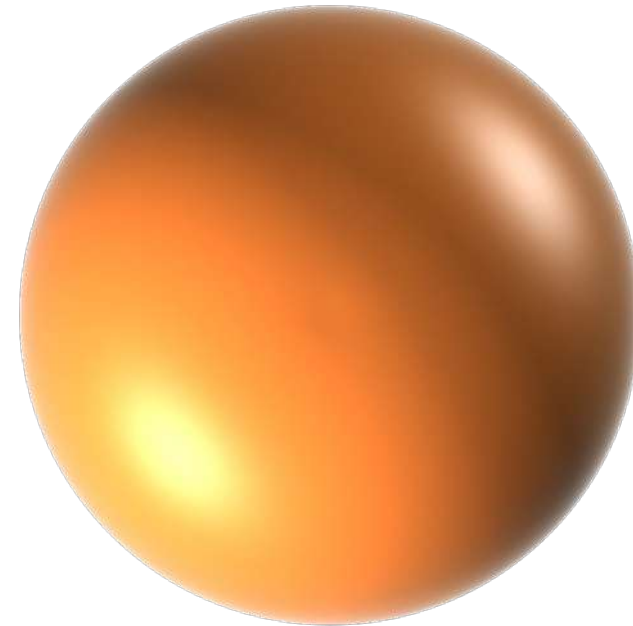
解説：



正六角形：重心を中心とした60度回転で形が不変



円：重心を中心とした任意の角度の回転で形が不変



球：重心を中心とした任意の角度の回転で形が不変

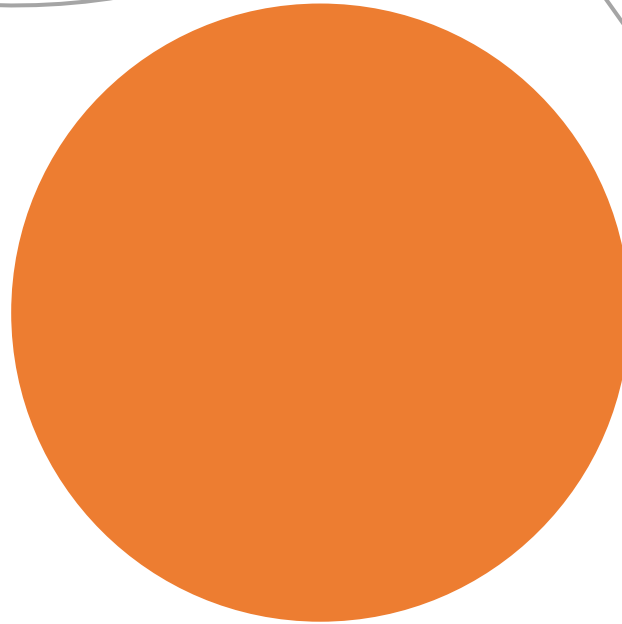
解説：

離散の変換：
一定のステップで
行われる操作

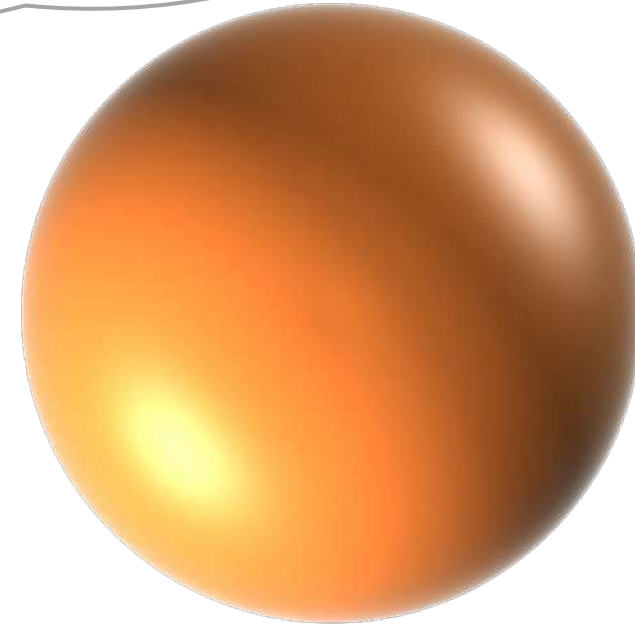
連続の変換：
いくらでも微小な
操作ができる



正六角形：重心を中心とした60度回転で形が不変



円：重心を中心とした任意の角度の回転で形が不変



球：重心を中心とした任意の角度の回転で形が不変

次は以下の例を考えてみよう！



次は以下の例を考えてみよう！



対称性を持ってい
そうなものがたく
さんある



自然界の法則に
対称性が関係し
ている??



究極の粒子：素粒子

水素分子

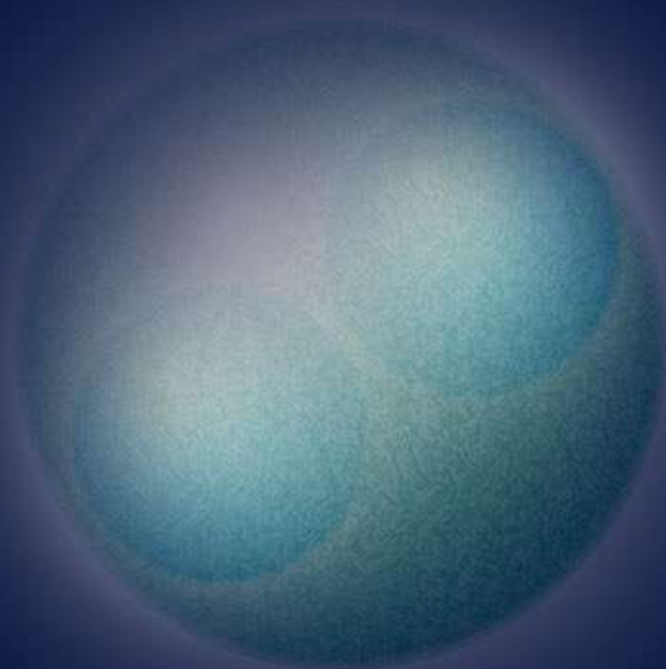


100pm

小さな長さの単位

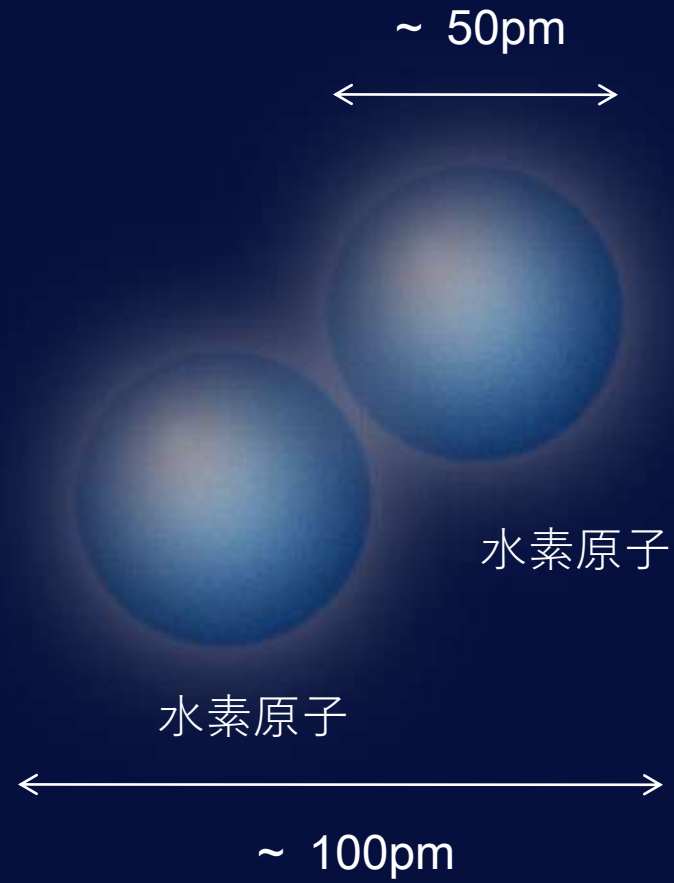
m	メートル		
mm	ミリメートル	10^{-3}m	1mの千分の1
μm	マイクロメートル	10^{-6}m	1mの百万分の1
nm	ナノメートル	10^{-9}m	1mの十億分の1
pm	ピコメートル	10^{-12}m	1mの一兆分の1
fm	フェムトメートル	10^{-15}m	1mの千兆の1

水素分子

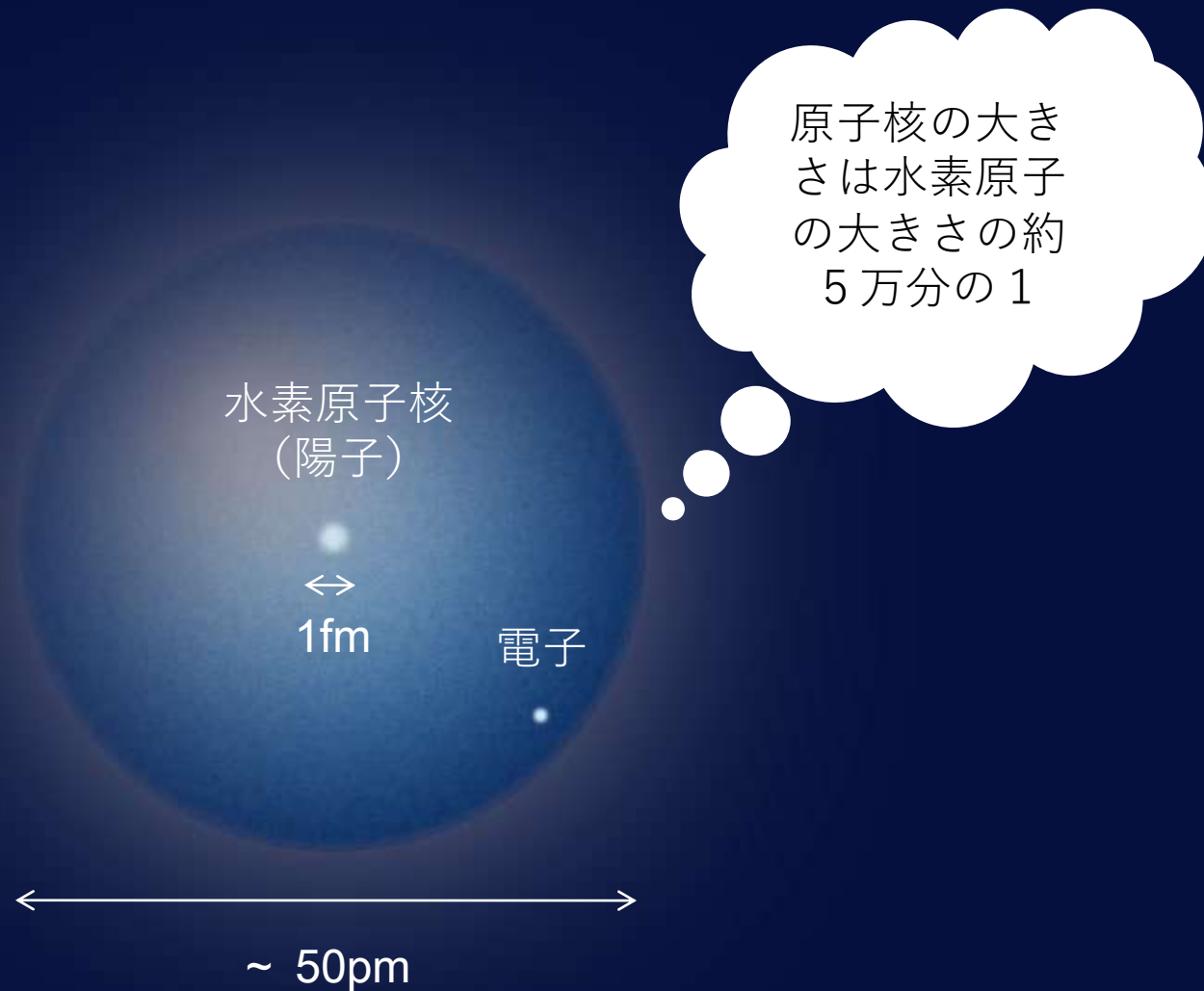


~ 100pm

水素分子



水素原子



重水素原子



ヘリウム原子



ヘリウム原子

電子



陽子 2 個
中性子 2 個



電子



ヘリウム原子核

陽子



中性子



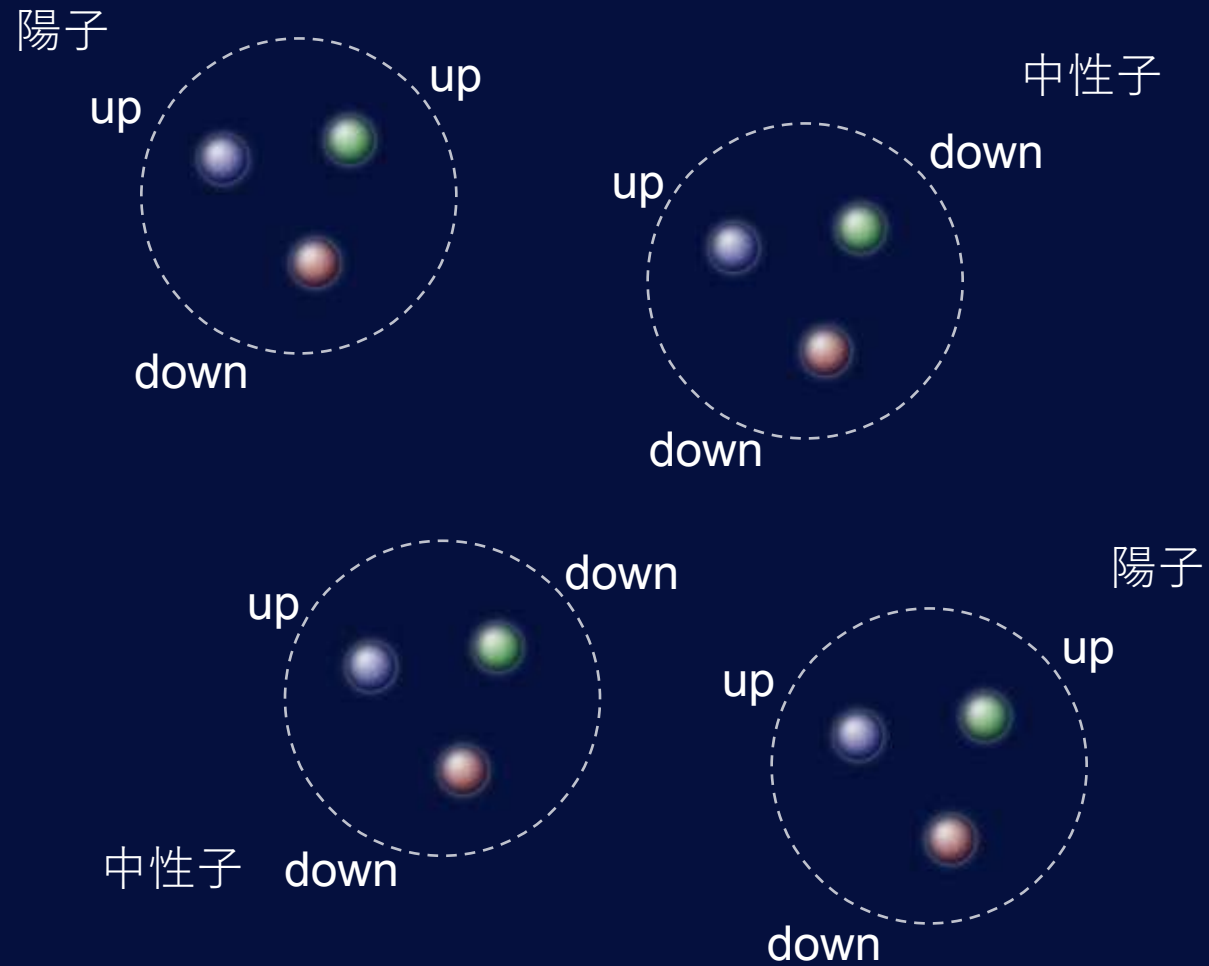
陽子



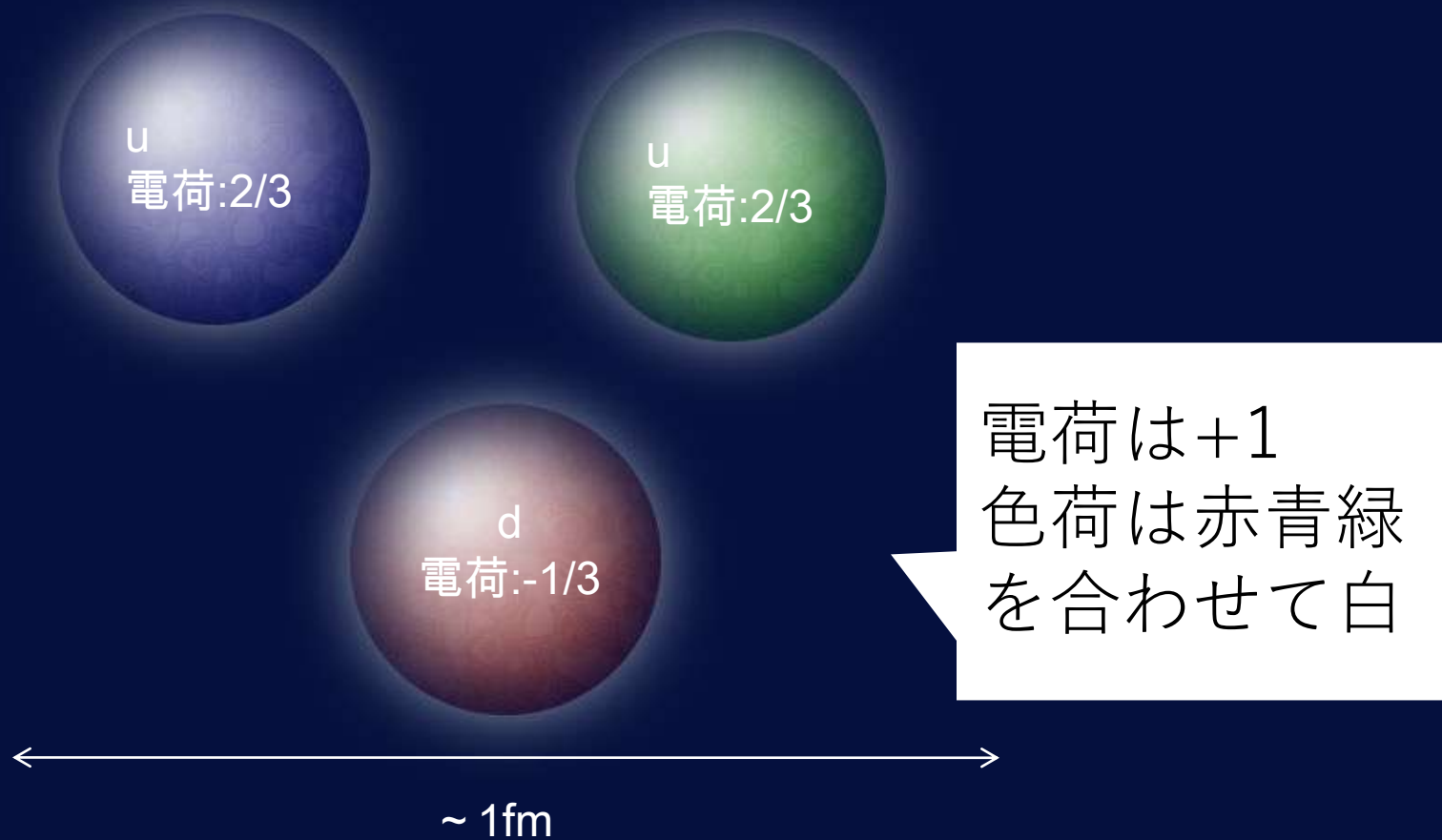
中性子



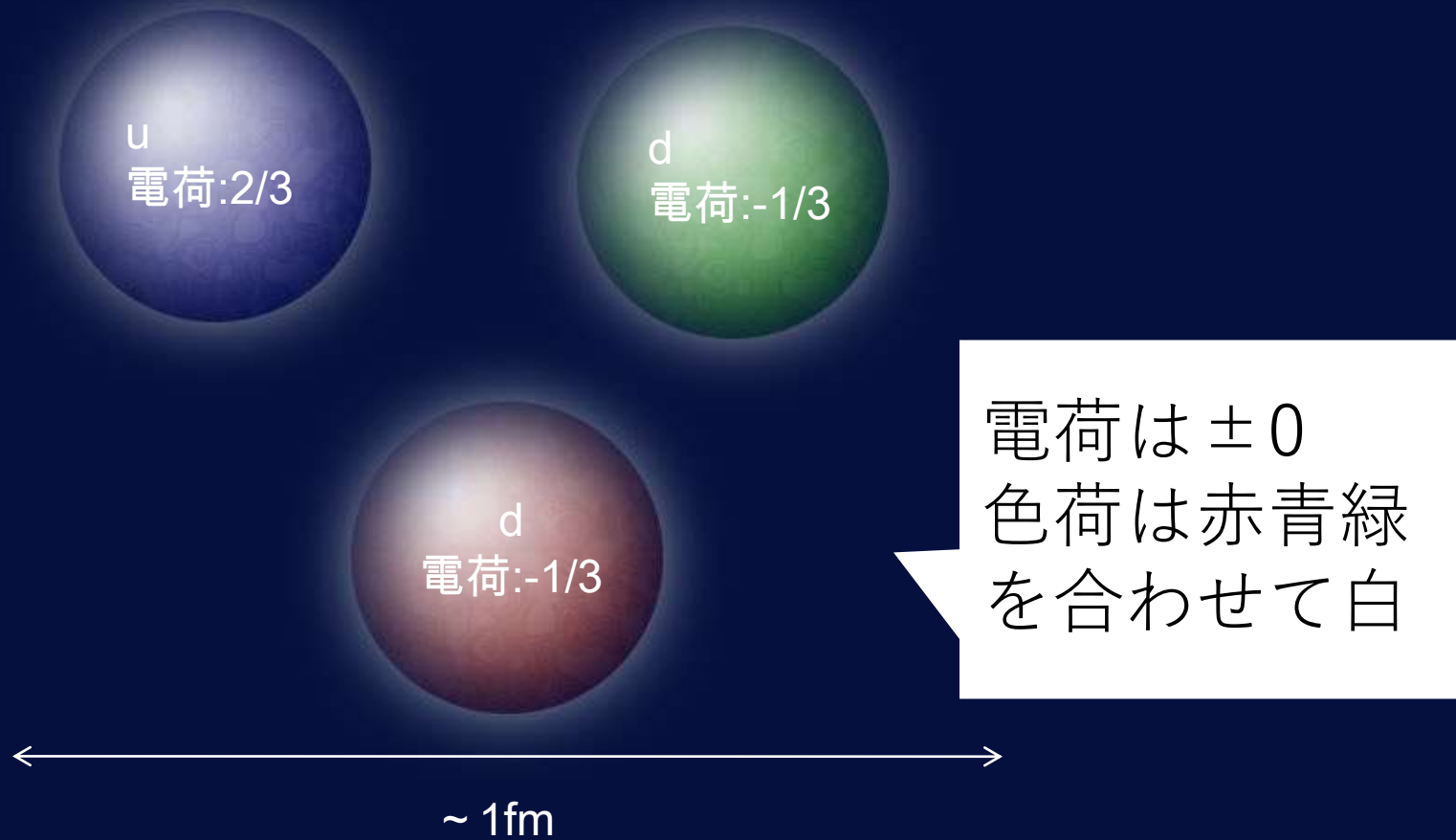
ヘリウム原子核














陽子



中性子



物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 eニュートリノ	 μニュートリノ	 τニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

ゲージ粒子

<p>強い力</p>  <p>グルーオン</p>
<p>電磁力</p>  <p>光子</p>
<p>弱い力</p>  <p>Wボソン Zボソン</p>

ヒッグス場に伴う粒子
(未発見)



ヒッグス粒子

究極の粒子の振る舞いを
記述する理論を作る

素粒子理論の構築

究極の理論

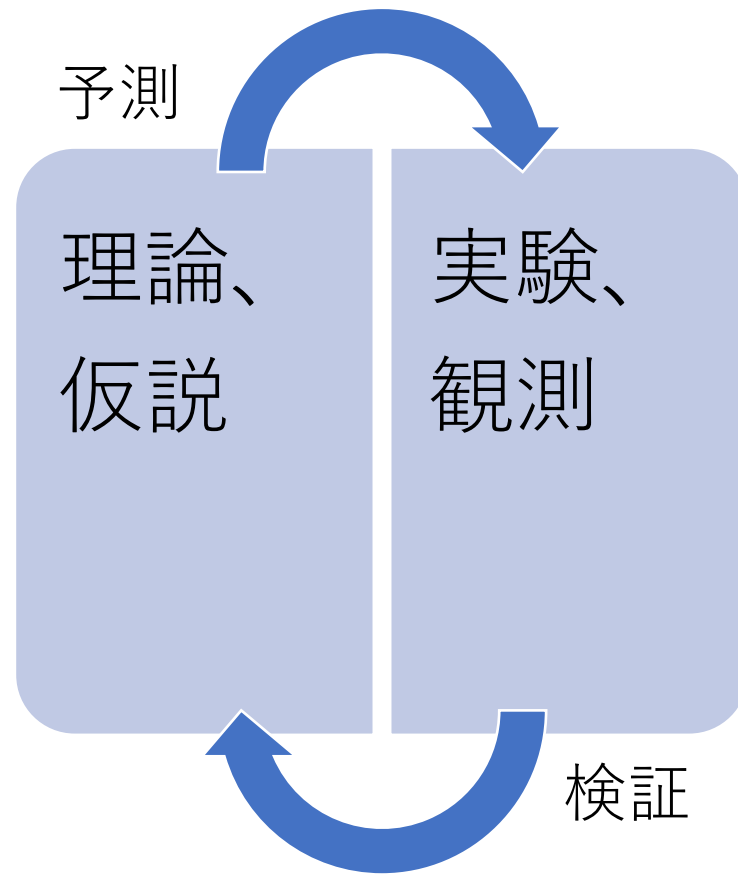
- 単純な原理から出発
例：時間反転対称性
- この世の全てを説明

観測事実

- 原理の正当性を検証
時間反転で変わる？
- パラメーターの決定

素粒子理論の構築

現象の中で観測された対称性は理論の対称性になっているか。対称性が破れる現象が観測される場合、理論でも対称性が破れているか？



理論の持つ対称性が現象の中に現れているか？現れていないとしたら、理論が間違っているのか、それとも現れない理由があるのか？

素粒子間の相互作用

- 自然界の4つの力

重力	質量を持つ粒子間	重力波??
電磁気力	電荷を持つ粒子間	光子（電磁波）
強い力	色荷のある粒子間	グルオン
弱い力	弱荷のある粒子間	Z, W^{\pm}

素粒子理論構築の基になる対称性

連続的対称性

平行移動

回転

ローレンツ変換

離散的対称性

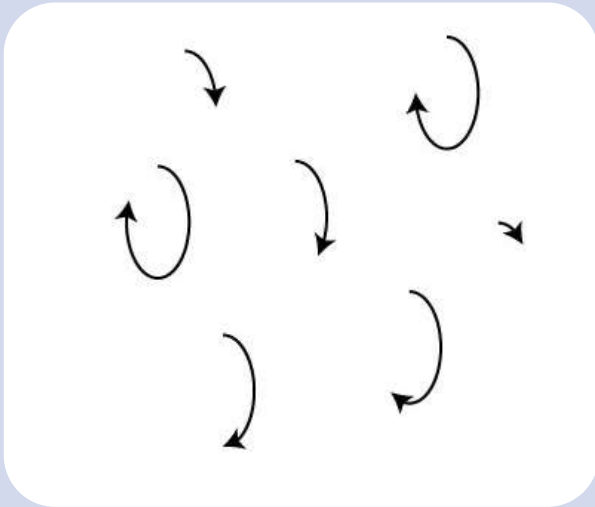
空間反転

時間反転

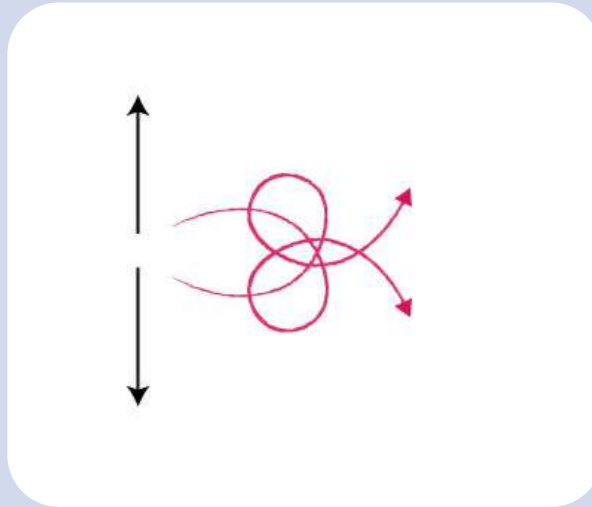
荷電共役

最も重要な概念はゲージ対称性

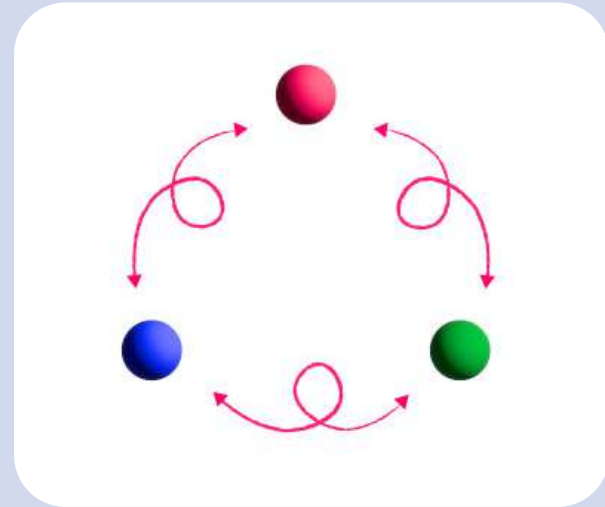
- ゲージ対称性：ゲージ変換の下で理論は不変
- 電磁気力、強い力、弱い力に対して3つのゲージ対称性



U(1)ゲージ変換



SU(2)ゲージ変換



SU(3)ゲージ変換

SU(2)ゲージ対称性が見えません

SU(2)ゲージ対称性：

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	アップ	チャーム	トップ
	ダウン	ストレンジ	ボトム
レプトン	eニュートリノ	μニュートリノ	τニュートリノ
	電子	ミューオン	タウ



アップタイプとダウンタイプ、電子の仲間とニュートリノは質量が全く違うので、入れ替えると違う理論に。



質量がなければ…

対称性の破れ

明白な破れ

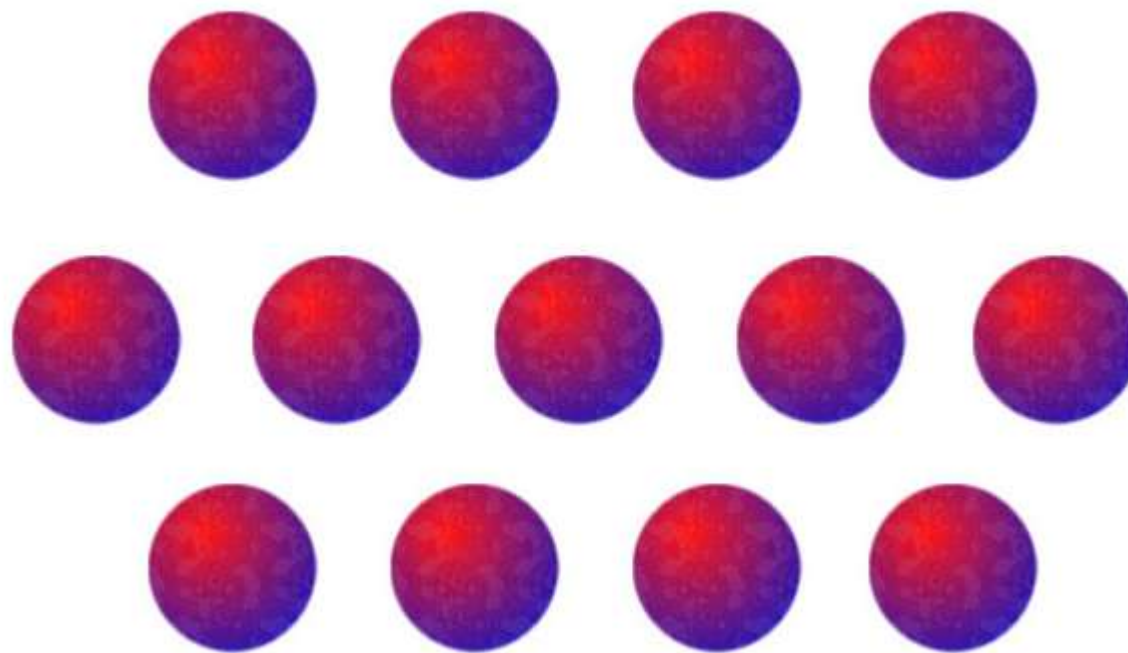
- 理論の中に対称性を破る要素がある
- 量子補正による破れを量子異常という

自発的破れ

- 理論は対称性を持つが、系の状態が対称性を破る

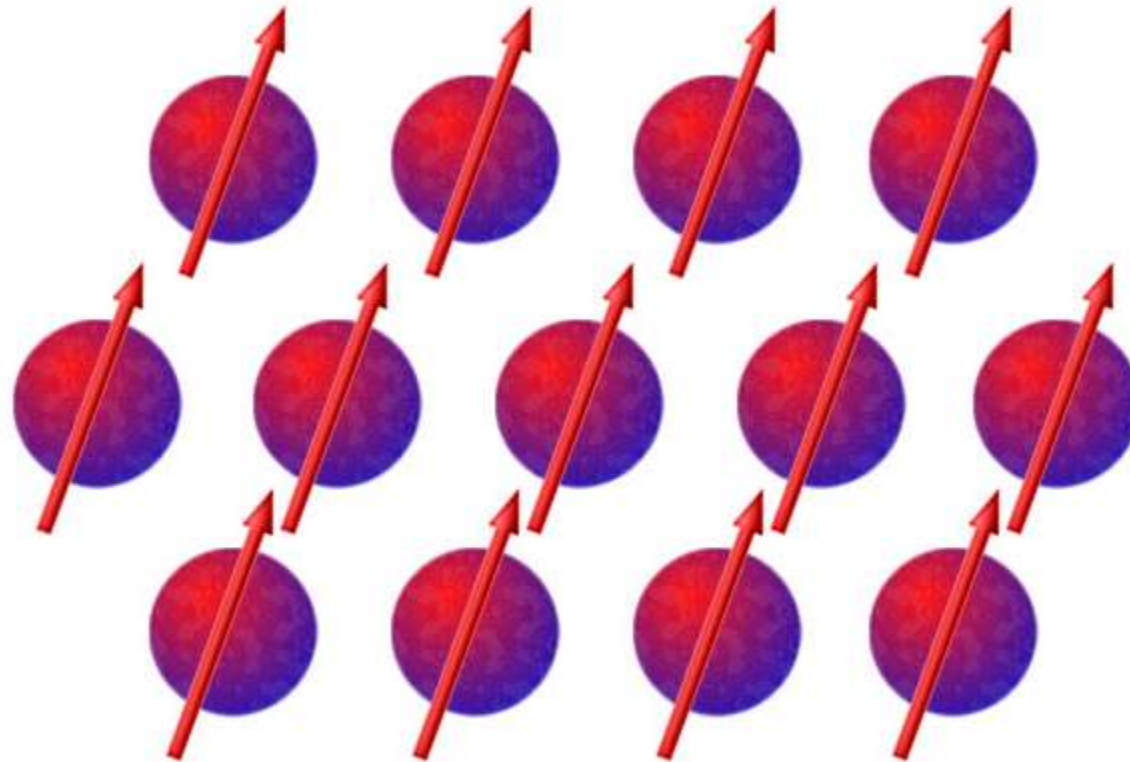
自発的対称性の破れの身近な例

- 磁石



自発的対称性の破れの身近な例

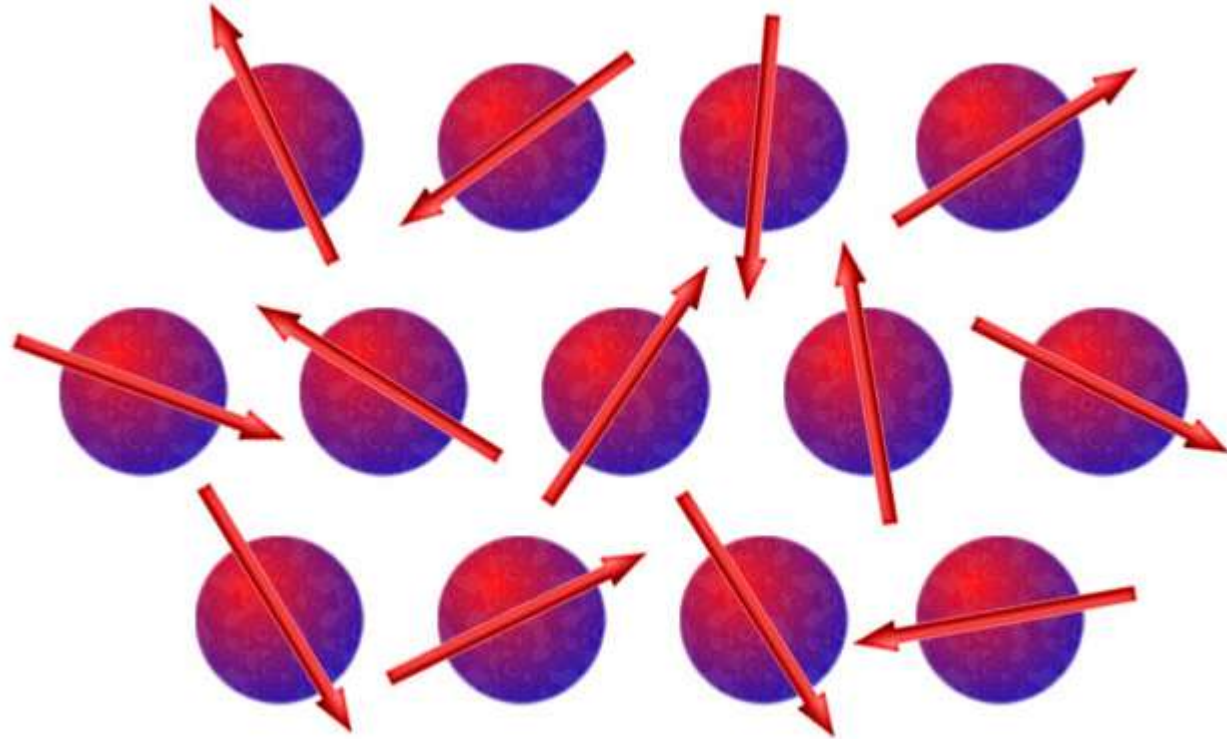
- 磁石



- 対称性が破れた状態

自発的対称性の破れの身近な例

- 磁石



➡ 温度を上げると対称性が回復

対称性の破れと質量の起源

超伝導：電子と電子がペアを組むことで光子は重くなる

素粒子の世界：クォークと反クォークがペアを組むことで対称性が自発的に破れる

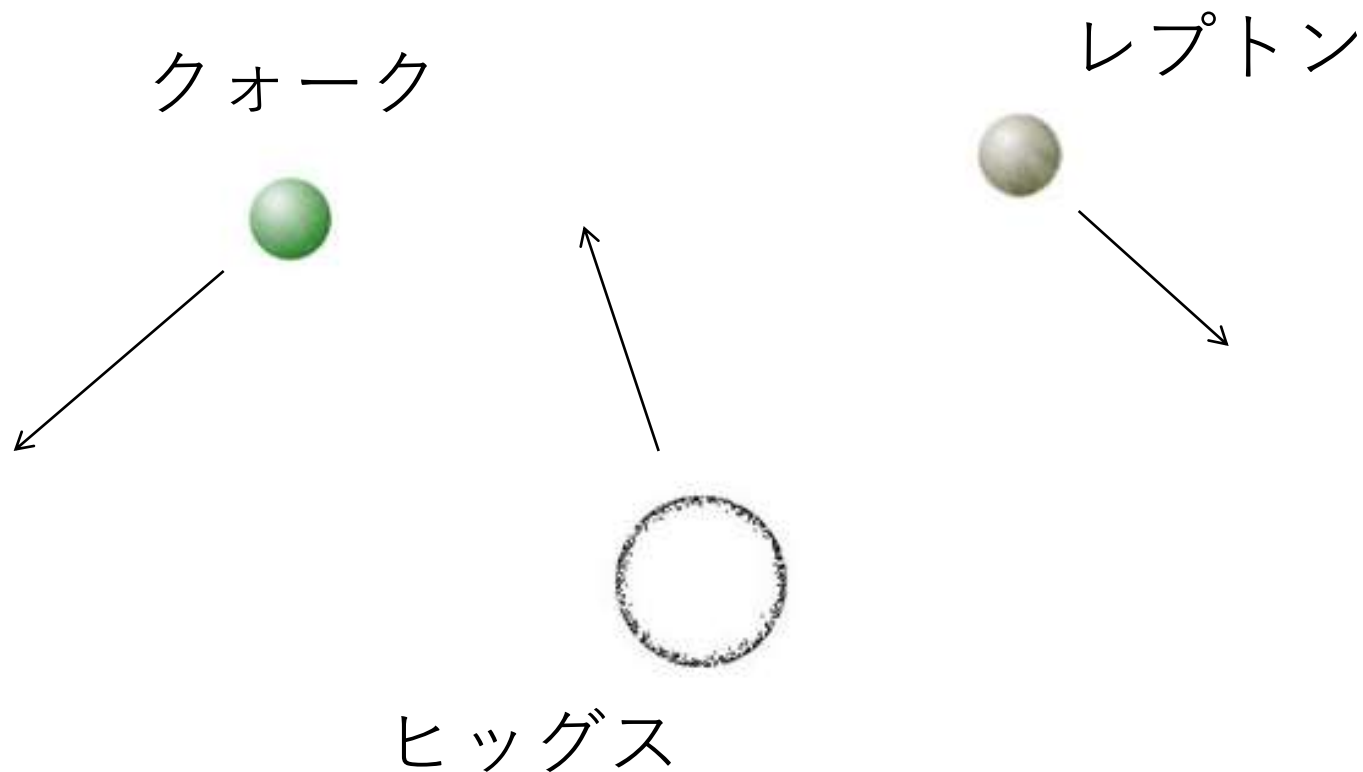
南部陽一郎, 1961



ヒッグス機構

Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen, Kibble, 1964

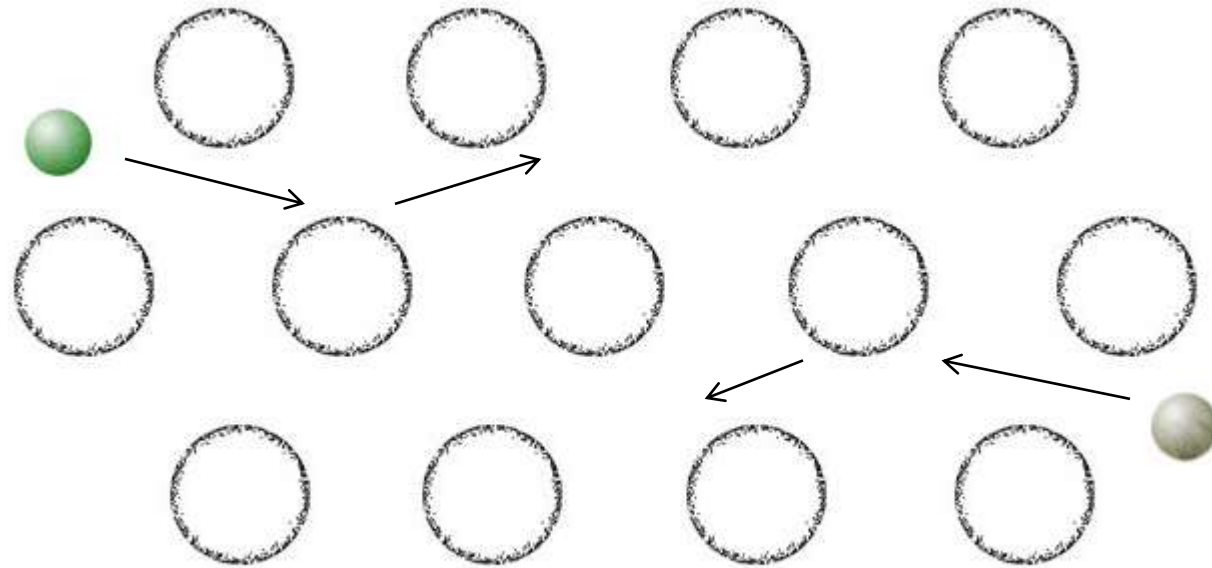
- 質量のないクォークとレプトンの世界



ヒッグス機構

Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen, Kibble, 1964

- 温度が下がると、

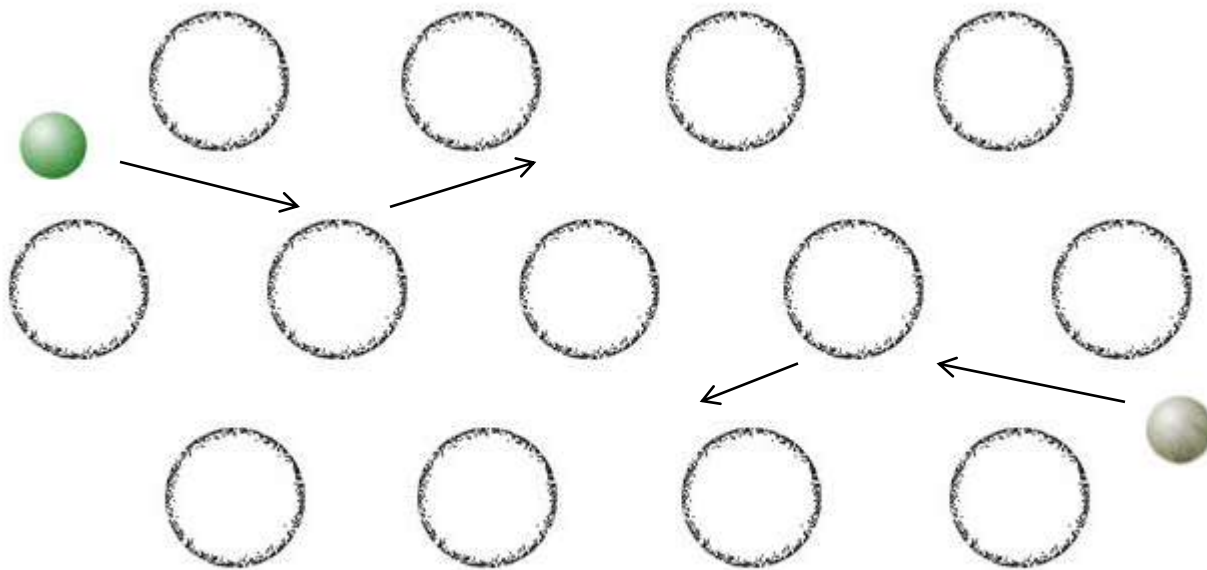


クォーク、レプトンが質量を持つ

ヒッグス機構

Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen, Kibble, 1964

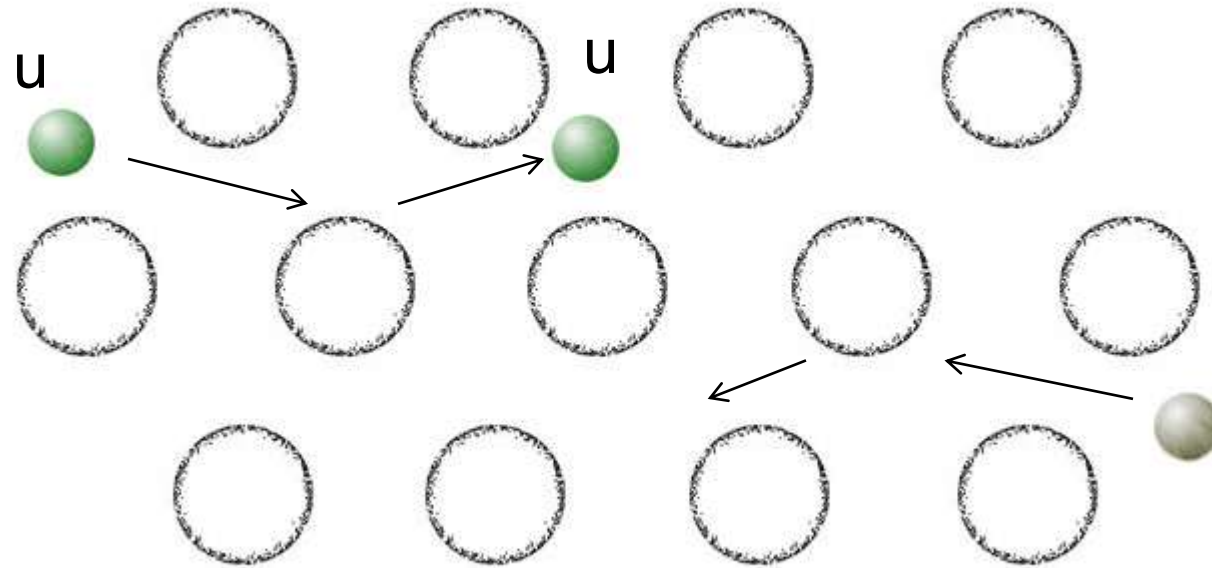
- 温度が下がると、



ゲージ粒子 Z , W^\pm も質量を持つ

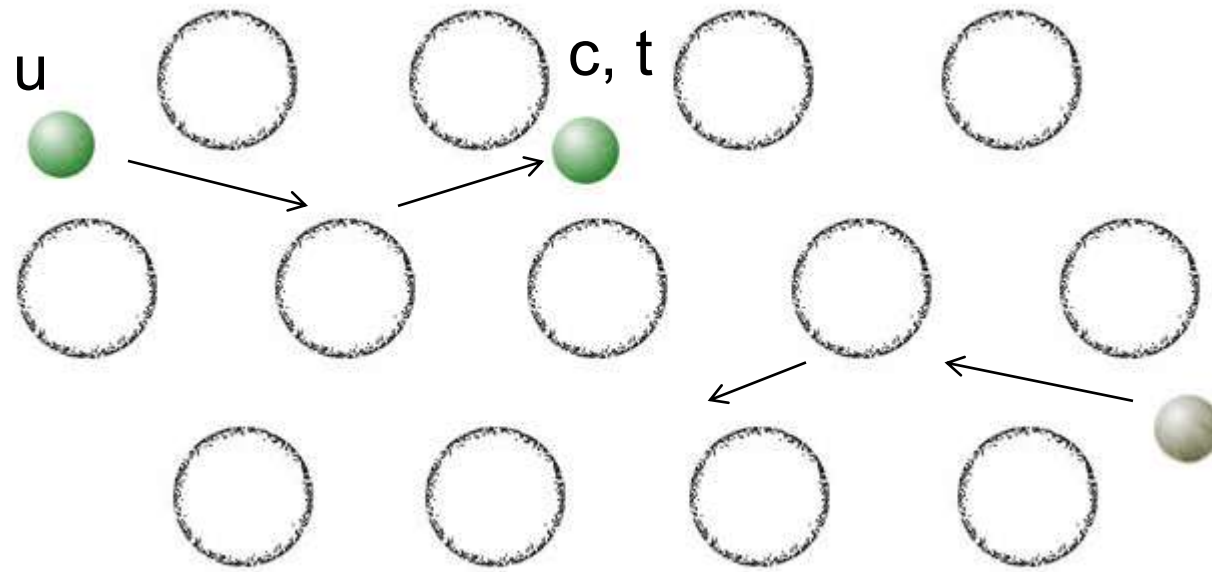
ヒッグス機構

Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen, Kibble, 1964



ヒッグス機構

Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen, Kibble, 1964



C P 対称性の破れ (小林・益川)

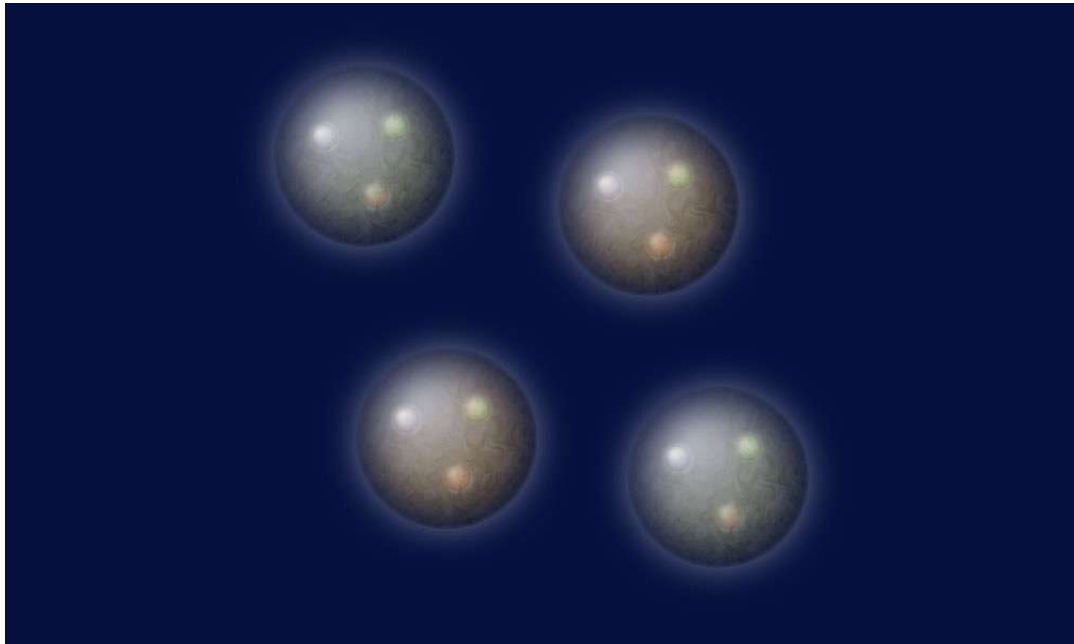
さいごに

本日の目的

- 対称性とは何かを理解する
- 連続的対称性と離散的対称性の違いを説明できる
- 素粒子理論の構築に対称性が重要であることを学ぶ
- 素粒子理論の構築に対称性の破れが重要であることを学ぶ

実はSU(3)ゲージ対称性も見えません

- カラー荷を持った粒子



カラー荷を持った粒子は陽子や中性子の中から出てこない。これを閉じ込めといいます。

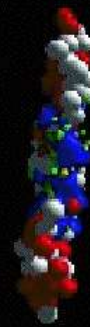
どうやったら取り出せるの？

重イオン衝突でクォークを解放する

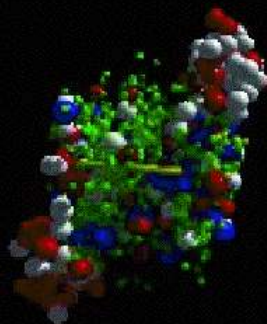
a)



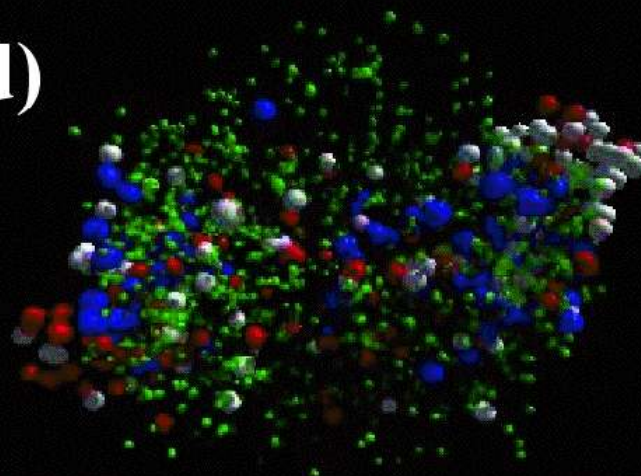
b)



c)

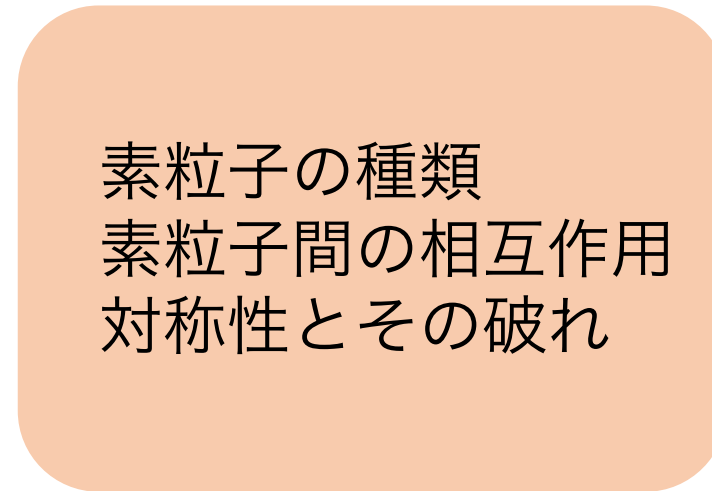
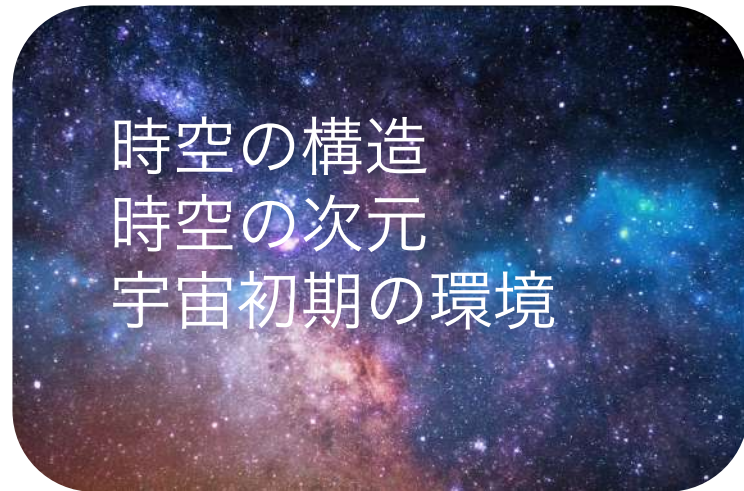


d)



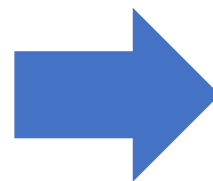
稲垣の研究室で研究しているテーマ

ターゲット



ツール

拡張した重力理論
標準模型を越えた素粒子模型
プロトタイプモデル



宇宙の始まりと今後？
暗黒エネルギー、暗黒物質の起源？
新しい理論、模型の提案と検証

<https://home.hiroshima-u.ac.jp/inagaki/>