

四葉研究交流会 2018

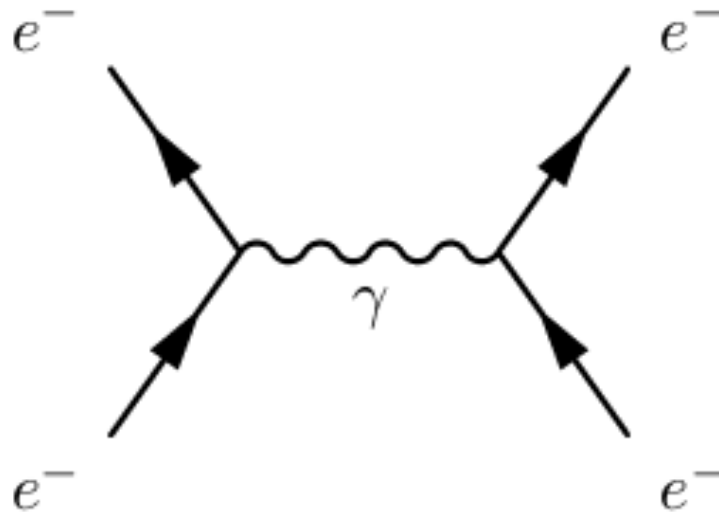
ポアンカレ群と素粒子の分類

東京理科大学 理学部 物理学科3年 鞠谷 温士

1.はじめに

1. はじめに

- 現代物理において素粒子とその相互作用の理論は「相対論的場の量子論」という枠組みで記述される.
- 相対論的不変性の要請から素粒子の持つ属性の一部を分類することができる.
- 本発表ではこの素粒子の分類について論ずる.



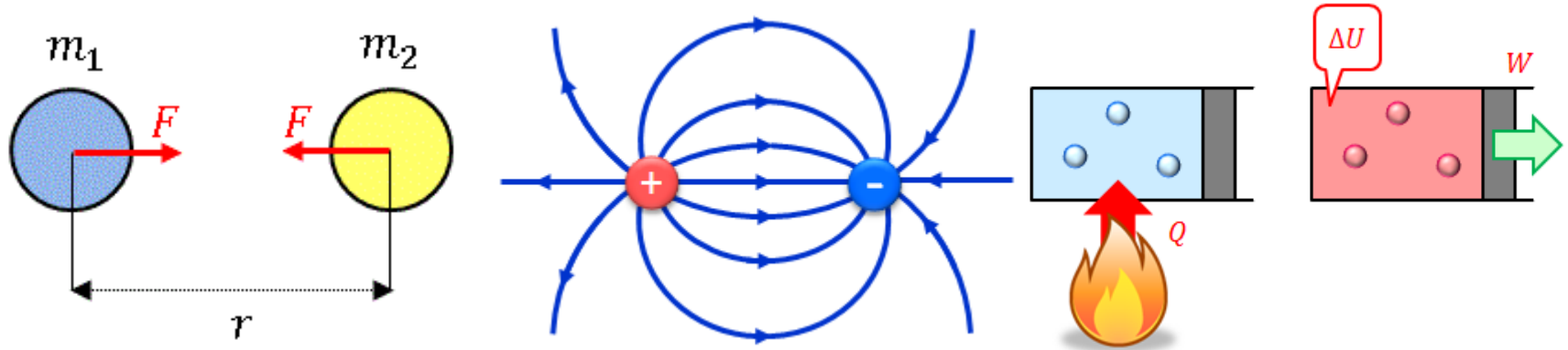
2. 相対論的場の量子論とは

2. 相対論的場の量子論とは

■ 19世紀までの物理学

- 力学: 地上の物体や天体の運動
- 電磁気学: 電気, 磁気, 光の物理
- 熱力学: 熱などマクロな現象

→ 多くの現象を説明



- しかし, これらのみでは説明のつかない現象がある.

2. 相対論的場の量子論とは

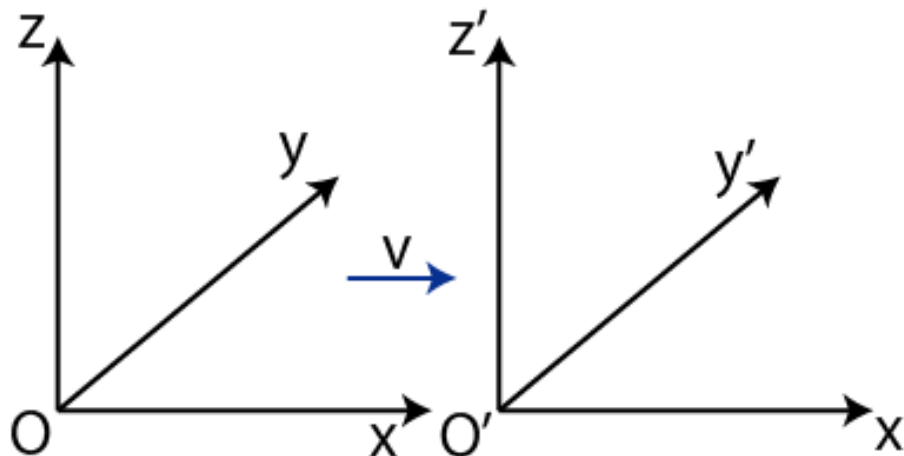
■ 特殊相対性理論

○ 光速不変の原理

- ・ 真空中の光の速度は任意の慣性系で不変である.
- ・ 時空概念の変革(慣性系間の座標変換はポアンカレ変換)

○ 特殊相対性原理

- ・ 任意の慣性系で物理法則は不変である.
- ・ 物理法則はポアンカレ変換で不変.

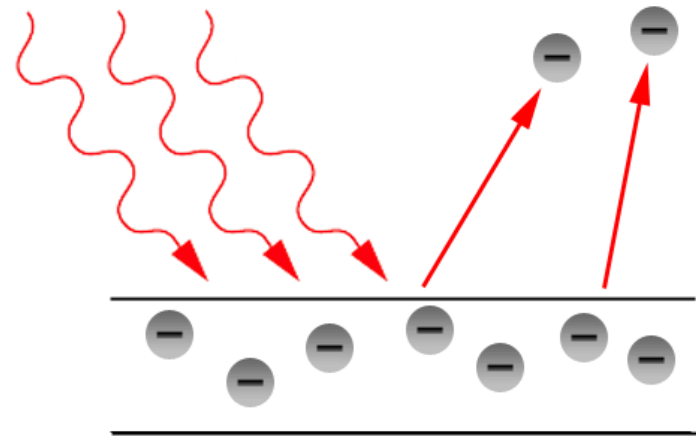
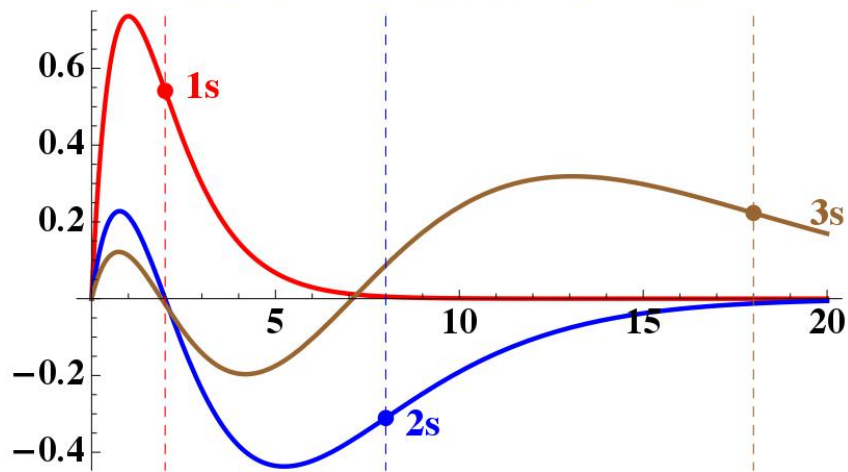


2. 相対論的場の量子論とは

■ 量子論

○ 粒子と波動の二重性

- ・ 電子は粒子であるとともに波動でもある.
- ・ 光は波動であるとともに粒子でもある.
- ・ 多くの現象の説明: 黒体放射, 光電効果, 原子スペクトル



2. 相対論的場の量子論とは

■相対論的場の量子論

○ 特殊相対論と量子論を統合

○ 場の量子化

・ 場(波動)を量子化することで, 粒子描像を得る.

○ 相対論的

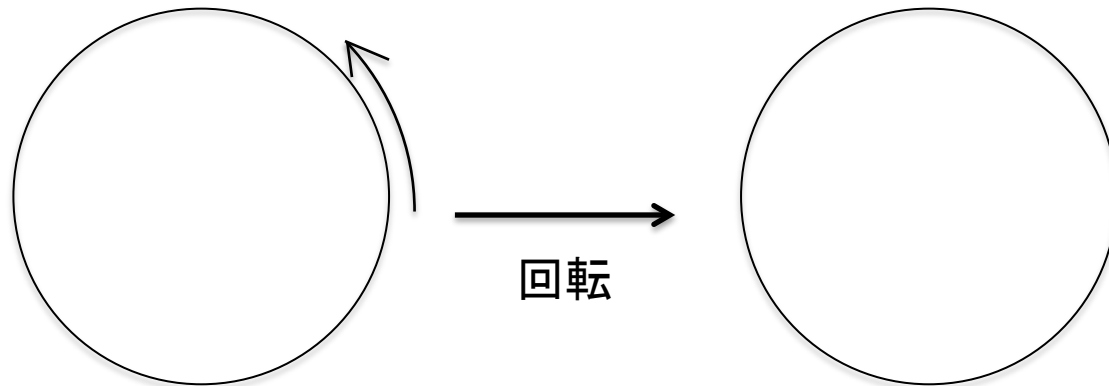
・ 相対論的場の量子論はポアンカレ不変性を持つ

2. 相対論的場の量子論とは

■ 不変性と対称性

○ 対象がある変換に対して不変であるとき, 対称性を持つという.

- ・ 例: 円は2次元回転に対して不変 → 回転対称性



○ 相対論的場の量子論 → ポアンカレ対称性

- ・ ポアンカレ対称性によって素粒子の分類が可能になる.

3. ポアンカレ群と素粒子の分類

3. ポアンカレ群と素粒子の分類

■ポアンカレ変換の生成子とポアンカレ代数

○ 理論のポアンカレ不変性に対応する保存量

P^μ : 4元運動量 (時空並進の生成子)

$J^{\mu\nu}$: 4元的角運動量 (ローレンツ変換の生成子)

○ ポアンカレ代数

$$[P^\mu, P^\nu] = 0$$

$$[J^{\mu\nu}, P^\rho] = -i(\eta^{\mu\rho} P^\nu - \eta^{\nu\rho} P^\mu)$$

$$[J^{\mu\nu}, J^{\rho\lambda}] = -i(\eta^{\mu\rho} J^{\nu\lambda} - \eta^{\nu\rho} J^{\mu\lambda} + \eta^{\mu\lambda} J^{\rho\nu} - \eta^{\nu\lambda} J^{\rho\mu})$$

3. ポアンカレ群と素粒子の分類

■ 4元運動量と質量による分類

○ 4元運動量とその内積の固有状態

$$P^\mu |p, \sigma\rangle = p^\mu |p, \sigma\rangle$$

$$P^2 |p, \sigma\rangle = m^2 |p, \sigma\rangle$$

○ 4元運動量と質量による分類

(I) $p^2 = m^2 > 0$, $p^0 > 0$: 有質量 1 粒子

(II) $p^2 = m^2 > 0$, $p^0 < 0$: 負エネルギー

(III) $p^2 = m^2 = 0$, $p^0 > 0$: 無質量 1 粒子

(IV) $p^2 = m^2 = 0$, $p^0 < 0$: 負エネルギー

(V) $p^2 = m^2 < 0$: タキオン

(VI) $p^\mu = 0$: 真空

3. ポアンカレ群と素粒子の分類

■真空

- 真空 (粒子のいない状態)

$$P^\mu |0\rangle = 0 \quad , \quad J^{\mu\nu} |0\rangle = 0$$

- 真空はポアンカレ変換で不変

$$U(\Lambda, a) |0\rangle = |0\rangle$$

3. ポアンカレ群と素粒子の分類

■ 質量を持つ1粒子

○ 4元運動量とスピンによる分類

$$P^\mu |p, s, s_z\rangle = p^\mu |p, s, s_z\rangle$$

$$S^2 |p, s, s_z\rangle = s(s+1) |p, s, s_z\rangle \quad (s = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, \dots)$$

$$S_z |p, s, s_z\rangle = s_z |p, s, s_z\rangle \quad (s_z = -s, -s+1, \dots, s-1, s)$$

S^2 :スピンの大きさ S_z :スピンの z 方向成分

○ 素粒子の例

場の種類	素粒子の例	スピン
スカラー場 ϕ	ヒッグス粒子	$s = 0$
ディラック場 ψ	電子, クォーク	$s = \frac{1}{2}, s_z = \pm \frac{1}{2}$
プロカ場 A_μ	W, Z ボソン	$s = 1, s_z = 0, \pm 1$

3. ポアンカレ群と素粒子の分類

■ 質量を持たない1粒子

○ 4元運動量とヘリシティによる分類

$$P^\mu |p, h\rangle = p^\mu |p, h\rangle$$

$$\hat{h} |p, h\rangle = h |p, h\rangle \quad (h = 0, \pm\frac{1}{2}, \pm 1, \dots)$$

\hat{h} : ヘリシティ(スピンの運動量方向成分)

○ 素粒子の例

場の種類	素粒子の例	ヘリシティ
カイラルスピノル ψ_R, ψ_L	(左巻きニュートリノ)* ⁹	$h = \pm\frac{1}{2}$
(無質量) ベクトル場 A_μ	光子, グルーオン	$h = \pm 1$
重力場 $g_{\mu\nu}$	重力子	$h = \pm 2$

4.まとめ

4. まとめ

- ポアンカレ対称性に基づいて素粒子の分類が可能.
- 実際の素粒子は他にも属性を持つ ex.)電荷,カラー...
- ポアンカレ対称性の拡張→超対称性

