

素粒子 (elementary particle)

素粒子は、あらゆる物質や力の根源的構成要素であるところの最小単位の粒子であり、その大きさは 10^{-13} cm 以下のスケールである。素粒子の衝突散乱過程についての近似計算などでは、素粒子は拡がりをもたない点状の粒子として取り扱われる。素粒子を理論的に研究するためには特殊相対性理論と量子論の詳細な知識が前提となるが、本稿ではそれら予備知識を前提とせず定性的な概説にとどめる。素粒子物理学は高エネルギー物理学の一部門であり、素粒子現象に関する知見を得るためには、極めて高いエネルギー領域での研究が必要となる。高エネルギー領域の加速器実験などにおいては、多種類の素粒子が出現する。現在では 数百種類の素粒子が知られているが、その大部分は不安定であり、他の安定な素粒子に崩壊転換する。安定な素粒子には、光子 (フォトン photon) , 電子 (エレクトロン electron) , ニュートリノ (neutrino) , 陽子 (プロトン proton) などがある。中性子 (ニュートロン neutron) は、単独では平均寿命が約 15 分でもって β (ベータ) 崩壊するが、原子核内においては安定的に存在すると看做せる。現在の素粒子の理論によると、陽子や中性子ならびに大部分の不安定な素粒子については、さらに基本的な粒子であるクォーク (quark) と呼ばれる粒子から構成されていると考えられている。ただし 光子や電子ならびにニュートリノは、現在でも基本的な粒子と考えられている。

基本粒子

現在の素粒子の標準理論において、基本粒子とみなされている粒子を以下の表に示す。

クォーク (quark)

記号	名称	電荷	重粒子数	スピン	質量 GeV/c^2	相互作用
u	アップ (up)	$+\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$(1.5 \sim 4) \times 10^{-3}$	弱・電・強
d	ダウン (down)	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$(4 \sim 8) \times 10^{-3}$	弱・電・強
c	チャーム (charm)	$+\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1.15 ~ 1.35	弱・電・強
s	ストレンジ (strange)	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$(80 \sim 130) \times 10^{-3}$	弱・電・強
t	トップ (top)	$+\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	174.3	弱・電・強
b	ボトム (bottom)	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	4.1 ~ 4.4	弱・電・強

表中において「弱」は弱い相互作用、「電」は電磁相互作用、「強」は強い相互作用を示す。

レプトン (lepton)

記号	名称	電荷	軽粒子数	スピン	質量 GeV/c^2	相互作用
ν_e	電子ニュートリノ (electro-neutrino)	0	1	$\frac{1}{2}$	≈ 0	弱
e	電子 (electron)	-1	1	$\frac{1}{2}$	0.511×10^{-3}	弱・電
ν_μ	ミュー ニュートリノ (mu-neutrino)	0	1	$\frac{1}{2}$	≈ 0	弱
μ	ミュー粒子 (muon)	-1	1	$\frac{1}{2}$	105.6×10^{-3}	弱・電
ν_τ	タウ ニュートリノ (tau-neutrino)	0	1	$\frac{1}{2}$	≈ 0	弱
τ	タウ粒子 (tauon)	-1	1	$\frac{1}{2}$	1.77	弱・電

ゲージ ボソン (gauge boson)

記号	名称	電荷	スピン	質量 GeV/c^2	相互作用
γ	光子 (photon)	0	1	0	電磁相互作用
W^+	W ボソン (weak boson)	+1	1	80.4	弱い相互作用
W^-	W ボソン (weak boson)	-1	1	80.4	弱い相互作用
Z	Z ボソン (Z boson)	0	1	91.18	弱い相互作用
g	グルーオン (gluon)	0	1	0	強い相互作用
G	グラビトン (graviton)	0	2	0 (未確認)	重力相互作用

ヒッグス ボソン (Higgs boson)

記号	名称	電荷	スピン	質量 GeV/c^2
H	ヒッグス ボソン (Higgs boson)	0	0	未確認

一般に素粒子は量子数によって分類される。ここで量子数とは素粒子の持つ数学的な対称性に起因しており、後述するように電荷や粒子数ならびにスピンなど様々なものがある。クォークとレプトンは物質の究極的構成要

素としての物質粒子である。ゲージ ボソンは各種の相互作用に関わる力の媒介粒子である。それぞれの基本粒子間に働く各種の相互作用により、数多くの複合粒子が構成されたり、粒子の崩壊現象などが生ずる。ゲージ ボソンの中で、グラビトン (重力子) は極めて作用が弱いので、通常の素粒子物理学のエネルギー スケールにおいては無視して差し支えない。ヒッグス ボソンは基本粒子に質量を与える作用をもつ粒子と考えられている。なお 後述するように 陽子や中性子などのようなハドロンと呼ばれる粒子族に属するものは、クォークから成る複合粒子であると考えられており、基本粒子とは看做されていない。

素粒子のスピン

素粒子はスピン (spin) が整数値を持つものと半奇数値を持つものとに大きく分けられる。ここでスピンとは $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (h はプランク定数) を単位として測った素粒子自身の持つ固有の角運動量である。整数値のスピンを持つ粒子をボソン (boson) またはボース粒子、半奇数値を持つ粒子をフェルミオン (fermion) またはフェルミ粒子という。すなわち ボソンのスピンは $0, 1, 2, \dots$ となるが、フェルミオンのスピンは $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$ となる。フェルミオンは同一の物理的状態に 1 個の粒子しか入り得ないが、ボソンは同一の状態に複数個の粒子が存在できる。物質の究極的構成要素であるクォークやレプトンなどはスピン $\frac{1}{2}$ を持つフェルミオンに属する。相互作用を媒介する粒子であるゲージ ボソンはスピン 1 または 2 を持つ。質量を与える作用を持つヒッグス ボソンはスピン 0 であり、いずれもボソンに属している。現在までのところ、ヒッグス ボソンとグラビトン (重力子) については実験的に確認されていない。

電荷や質量の単位

素粒子の電荷については、陽子 p の電荷を基準として、その倍数でもって表す。また 素粒子の質量の単位としては、 eV/c^2 (エレクトロンボルト/ c^2) が主に用いられる。ただし c は真空中の光速を意味する。この単位を用いると、陽子 p の質量が約 $1 \text{ GeV}/c^2$ の程度となるので、素粒子物理学の分野においては便利な単位である。 eV はエネルギーの単位であって、SI 単位の J (ジュール) と eV の関係は、 $1 \text{ eV} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ である。この関係は、電子を 1 V (ボルト) の電圧で加速したとき電子の得るエネルギーが 1 eV であることに由来する。高エネルギーにおいては MeV (メガ エレクトロンボルト) や GeV (ギガ エレクトロンボルト) などが主に用いられる。ここで $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ならびに $1 \text{ GeV} = 10^3 \text{ MeV} = 10^9 \text{ eV}$ である。

反粒子

すべて素粒子は、一つの粒子に対して必ず一つの反粒子が存在する。反粒子は、スピンについては粒子と同じであるが、電荷や粒子数に関しては、すべて逆符号となる。粒子と反粒子が全く同一となるような素粒子もある。粒子と反粒子が同一の例としては、光子や π^0 中間子などがある。経験的に知られている多くの物質はすべて粒子から構成されており、反粒子から成る物質すなわち反物質は現在のところ発見されていない。粒子と反粒子が衝突し、それらがすべて消滅して他の素粒子になる現象のことを対消滅という。一例としては 約 1 MeV のエネルギーを持つ電子 e^- とその反粒子である陽電子 e^+ が衝突すると、対消滅し 2 個の光子 (γ 線) になる。すなわち

$$e^- + e^+ \longrightarrow \gamma + \gamma$$

のように記せる。これに対して、粒子と反粒子が対になって生ずる現象のことを対生成という。

ハドロン

ハドロン (hadron) とは強い相互作用をする素粒子の総称であって、陽子 p や中性子 n ならびに π 中間子など数多くの素粒子が存在する。陽子 p を除く他のハドロンは不安定であって他の素粒子に崩壊する。ハドロンはすべてクォークから成る複合粒子である。一例として陽子 p は、2 個のアップ u と 1 個のダウン d から成る。すなわち $p \approx uud$ のように記せる。中性子 n では、1 個のアップ u と 2 個のダウン d から成る。すなわち $n \approx udd$ のように記せる。クォーク間にはグルーオンと呼ばれるゲージボソンを媒介として強い相互作用が働く。クォークには、 u (アップ up), d (ダウン down), c (チャーム charm), s (ストレンジ strange), t (トップ top), b (ボトム bottom) の 6 種類が存在する。すべてのクォークはカラー (color) という量子数をもっている。クォークのカラーには、ブルー (blue), グリーン (green), レッド (red) の 3 種類がある。異なるカラーを持つクォーク間にはカラーによる強い引力が働き、複数のクォークの束縛状態として多種類のハドロンが形成される。

クォークの種類と量子数を次の表に示す。

クォークの種類	Q	B	I	I_3	S	C	T	B	有効質量 GeV/c^2
u (アップ)	$+\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	0	0	0	0	0.3
d (ダウン)	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	0	0	0.3
c (チャーム)	$+\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	+1	0	0	1.5
s (ストレンジ)	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	0	-1	0	0	0	0.5
t (トップ)	$+\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0	+1	0	175
b (ボトム)	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0	0	-1	5

ただし Q : 電荷, B : 重粒子数, I : アイソスピン, I_3 : アイソスピンの第3成分, S : ストレンジネス, C : チャーム, T : トップ, B : ボトム である。

クォークの反粒子である反クォークの種類と各量子数についても次頁の表に示す。
反粒子を表す記号として、上付きの $-$ が用いられる。

反クォークの種類	Q	B	I	I_3	S	C	T	B	有効質量 GeV/c^2
$\bar{u}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	0	0	0.3
$\bar{d}$	$+\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	0	0	0	0	0.3
$\bar{c}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	-1	0	0	1.5
$\bar{s}$	$+\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0	+1	0	0	0	0.5
$\bar{t}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	0	-1	0	175
$\bar{b}$	$+\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	0	0	+1	5

クォーク間に働く強い力は、クォークが互いに離れる程大きな引力が働くという性質がある。ハドロンは、その構成要素となるクォークの持つカラーの総和が互いに相殺するような組み合わせでもってできているので、ハドロン自体のカラーは無色となる。クォークはこのカラーを持つために、クォーク自身は常にハドロンの中に閉じ込められており、クォーク単独で観測されることはない。このようなクォーク間の強い相互作用は、グルーオンという基本粒子が媒介する。グルーオンは質量や電荷を持たず、スピン1のゲージボソンである。グルーオンは2種のカラーの組み合わせを持ち、全部で8種類のカラーの異なるグルーオンがある。このようにハドロンに関しては、基本粒子であるクォークから構成された複合粒子であるが、レプトンやゲージボソンなどは現在のところでは基本的な素粒子すなわち基本粒子とみなされる。実際に、レプトンや光子ならびにWボソン、Zボソンなどは単独の基本粒子として観測され、強い相互作用は働かない。ただし理論上の学説としてはハドロン以外の素粒子も複合粒子であると考えられる研究がある。ハドロンは、重粒子(バリオン)族と中間子(メソン)族に分けられる。重粒子族はフェルミオンに属するが、中間子族はボソンに属する。重粒子族は3個のクォークから成るが、中間子族はクォークと反クォークの対から成る。重粒子の持つ量子数の一つであるバリオン数(重粒子数)の値は1となるが、中間子のバリオン数については0となる。多くのハドロンは高エネルギー加速器における粒子散乱実験によって生成される。現在では数百種類のハドロンが知られているが、その大部分は不安定で他の安定な素粒子に崩壊転換する。ハドロンの中、陽子は唯一安定に存在する素粒子である。単独の中性子は β 崩壊と呼ばれる現象により、陽子や電子ならびに反ニュートリノに崩壊する。通常原子核では、陽子や中性子が中間子を媒介粒子として強く結合して構成される。最も簡単な原子核は水素核であって、これは陽子1個から成る。

各種のハドロンの質量やその構成クォークなどについては次の表に示す。

重粒子 (バリオン) 族

ハドロンの種類	構成クォーク	ハドロン質量 MeV/c^2	主な崩壊様式
陽子 p	uud	938.27	安定
中性子 n	udd	939.56	$\bar{\nu}_e p e^-$
デルタ粒子 Δ^{++}	uuu	1230 ~ 1670	$N \pi \pi$
Δ^+	uud		
Δ^0	udd		
Δ^-	ddd		
ラムダ粒子 Λ^0	uds	1115.68	$p \pi^-, n \pi^0$
シグマ粒子 Σ^+	uus	1189.37	$p \pi^0, n \pi^+$
Σ^0	uds	1192.55	$\Lambda^0 \gamma$
Σ^-	dds	1197.43	$n \pi^-$
グザイ粒子 Ξ^0	uss	1314.9	$\Lambda^0 \pi^0$
Ξ^-	dss	1321.32	$\Lambda^0 \pi^-$
オメガ粒子 Ω^-	sss	1672.45	$\Lambda^0 K^-, \Xi^0 \pi^-$
ラムダ粒子 Λ_c^+	udc	2593.6	$p K^- \pi^+$
Σ_c 粒子 Σ_c^{++}	uuc	2452.9	$\Lambda_c^+ \pi^+$
Σ_c^+	udc	2453.5	$\Lambda_c^+ \pi^0$
Σ_c^0	ddc	2452.1	$\Lambda_c^+ \pi^-$
Ξ_c 粒子 Ξ_c^+	usc	2465.6	$\Lambda^0 K^- \pi^+ \pi^+$
Ξ_c^0	dsc	2470.3	$\Xi^- \pi^+$
Ω_c 粒子 Ω_c^0	ssc	2704	$\Sigma^+ K^- K^- \pi^+$

中間子 (メソン) 族

ハドロンの種類	構成クォーク	ハドロン質量 MeV/c^2	主な崩壊様式
パイ中間子 π^+	$u\bar{d}$	139.57	$\mu^+ \nu_\mu$
π^0	$u\bar{u} - d\bar{d}$	134.97	$\gamma \gamma$
π^-	$\bar{u}d$	139.57	$\mu^- \nu_\mu$
K 中間子 K^+	$u\bar{s}$	493.67	$\mu^+ \nu_\mu$
K^0	$d\bar{s}$	497.67	$\pi^+ \pi^-, \pi^0 \pi^0$
$\bar{K}^0$	$\bar{d}s$		
K^-	$\bar{u}s$	493.67	$\mu^- \nu_\mu$
D 中間子 D^+	$\bar{d}c$	1869.3	$K^0 \mu^+ \nu_\mu$
D^0	$\bar{u}c$	1864.5	$K^- \pi^+, K^- e^+ \nu_e$
$\bar{D}^0$	$u\bar{c}$		
D^-	$d\bar{c}$	1869.3	$\mu^- \nu_\mu$
B 中間子 B^+	$u\bar{b}$	5278.9	$D^0 \mu^+ \nu_\mu$
B^0	$d\bar{b}$	5279.2	$D^- \mu^+ \nu_\mu$
$\bar{B}^0$	$\bar{d}b$		
B^-	$\bar{u}b$	5278.9	$D^0 \mu^- \nu_\mu$

素粒子の量子数

量子数とは素粒子の持つ数学的な対称性に起因しており、素粒子はこれらの量子数によって分類される。素粒子の量子数には、以下のものがある。

電荷 (electric charge) Q

素粒子の電荷 Q は陽子の電気量 $1.60217733 \times 10^{-19} \text{C}$ を単位として測った素粒子の電気量であって、観測される素粒子では $+1, 0, -1$ である。あらゆる素粒子反応において電荷 Q は保存される。すなわち反応前と反応後について電荷の総和は常に不変である。ハドロンの構成要素であるクォークは、分数電荷 $\frac{2}{3}$ または $-\frac{1}{3}$ を持つ。なお反粒子の電荷については、逆符号となる。

重粒子数 (baryon number) B

バリオンを表わす量子数の一つで、その値はすべてのバリオンについて 1 、反バリオンについては -1 である。バリオン以外の素粒子については、すべて 0 である。素粒子反応過程において重粒子数 B は常に保存される。ハドロンの構成要素であるクォークの重粒子数は、分数値 $\frac{1}{3}$ を持つ。

軽粒子数 (lepton number) L

レプトンを表わす量子数の一つで、その値はすべてのレプトンについて 1 、反レプトンについては -1 である。素粒子反応過程において軽粒子数 L は常に保存される。

スピン (spin) J

素粒子のスピン J は $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (h はプランク定数) を単位として測った素粒子自身の持つ固有の角運動量であって、現在観測されている多くの素粒子では、その値は $0, \frac{1}{2}, 1$ である。ここでプランク定数 h とは、量子論における基本定数であって、その値は約 $h \approx 6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ である。スピン $\frac{1}{2}$ のフェルミオンは、数学的にはスピノールとしての性質を持つ。スピン 0 や 1 のボソンについては、それぞれスカラーやベクトルとしての数学的性質を持つ。一般にスピン J の粒子は、その第 3 成分の値 J_3 が異なるいくつかの状態をとり得る。スピン J とすると、その第 3 成分 J_3 のとり得る値は $-J \leq J_3 \leq J$ である。

(ただし $J_3 = J, J_3 - 1, J_3 - 2, \dots, -J$ となる。) 質量をもち、スピン $\frac{1}{2}$ のフェルミオンについては、スピン $+\frac{1}{2}$ と $-\frac{1}{2}$ の二つの状態をとり得る。質量 0 でスピン $\frac{1}{2}$ のフェルミオンは、スピンの向きが粒子の進む向きまたは逆向きの状態しかとり得ない。スピン 0 のボソンについては、スピン 0 の一状態しかない。質量をもち、スピン 1 のボソンは、三つのスピン状態 $+1, 0, -1$ をとり得るが、質量が 0 の場合には二つのスピン状態しかとり得ない。一般にスピンが 0 以外の値を持つとき、それに付随した磁気モーメントが生ずるため、そのような粒子は磁場からの影響を受ける。なお 反粒子のスピンについては、粒子と同一である。

パリティ (parity) P

素粒子の状態を表わす波動関数が、空間座標の反転に対して符号を変えないとき P を $+$ 、符号を変えると P は $-$ と決める。波動関数とは、素粒子がある空間領域に存在する確率を規定するもので、量子論における基本概念の一つである。空間座標の反転とは、各座標軸 x, y, z を $-x, -y, -z$ にする変換のことをいう。この変換は任意の空間点を座標原点に関する鏡像点に移す変換である。反粒子のパリティに関しては、フェルミオンの場合には逆符号となるが、ボソンの場合は粒子と同一である。

アイソスピン (isospin) I

ハドロンの内部自由度を表わす量子数として導入された。電荷等は異なるが質量がほぼ等しい粒子類については、同一粒子の異なるアイソスピンの状態と考える。一般に粒子はアイソスピン I は同一であっても、その第 3 成分の値が異なるいくつかの状態をとり得る。アイソスピン I とすると、その第 3 成分 I_3 のとり得る値は $-I \leq I_3 \leq I$ である。

ただし $I_3 = I, I_3 - 1, I_3 - 2, \dots, -I$ となる。すなわちアイソスピン $\frac{1}{2}$ を持つハドロンは、アイソスピンの第 3 成分 I_3 が $\frac{1}{2}$ と $-\frac{1}{2}$ の二つの異なるアイソスピン状態をとる。アイソスピン 1 を持つハドロンは、アイソスピンの第 3 成分 I_3 が $1, 0, -1$ の三つの異なるアイソスピン状態をとる。

例えば陽子と中性子はアイソスピン $I = \frac{1}{2}$ を持つ同一核子が異なるアイソスピン状態をとったもので、陽子はアイソスピンの第 3 成分 I_3 が $+\frac{1}{2}$ のときで、中性子は I_3 が $-\frac{1}{2}$ のときである。また π 中間子は $I = 1$ をもち、 π^+, π^0, π^- は I_3 がそれぞれ $1, 0, -1$ のときである。反粒子のアイソスピンは粒子のスピンと同一であるが、アイソスピンの第 3 成分 I_3 については逆符号となる。

ストレンジネス (strangeness) S

ハドロンを分類し素粒子反応を系統的に記述するために用いられる内部量子数である。例えば 陽子, 中性子, π 中間子などは $S = 0$ であるが, Λ 粒子や Σ 粒子などは $S = -1$, K 中間子は $S = +1$ である。反粒子のストレンジネスは逆符号となる。

ハイパーチャージ (hypercharge) Y

ハドロンの性質を表わす量子数で重粒子数 B とストレンジネス S の和 $B + S$ である。反粒子のハイパーチャージは逆符号となる。

量子数の間の関係

前述の量子数の間には次式のような関係がある。

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}(B + S + C + B + T)$$

[例] ハドロンの量子数

ハドロンの種類	Q	B	L	J	P	I	I_3	S	Y
陽子	1	1	0	$\frac{1}{2}$	+	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	0	1
反陽子	-1	-1	0	$\frac{1}{2}$	-	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	-1
中性子	0	1	0	$\frac{1}{2}$	+	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	1
反中性子	0	-1	0	$\frac{1}{2}$	-	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	0	-1
π^+ 中間子	1	0	0	0	-	1	+1	0	0
π^0 中間子	0	0	0	0	-	1	0	0	0
π^- 中間子	-1	0	0	0	-	1	-1	0	0

相互作用 (interaction) の種類

相互作用とは、素粒子間に働く各種の力の総称である。この素粒子間の相互作用の結果として原子核や原子などの多粒子系が構成される。相互作用の性質は、素粒子の散乱や崩壊などの素粒子反応に反映される。一般に素粒子の相互作用は互いにボソンに属する粒子を交換することによって生ずる。例えば電子間に働く静電気力は相互作用の一種であり、これは電子が互いに光子を交換することによって生ずるもので、電磁相互作用と呼ばれる。また陽子 p や中性子 n ならびに π 中間子などは、グルーオンを交換する強い相互作用によって構成される複合粒子であって、これはハドロンと呼ばれる素粒子に属する。また中性子 n が陽子 p と電子 e^- 並びに反ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ に崩壊する現象は β 崩壊として知られているが、この β 崩壊は弱い相互作用によって起こり、 W ボソンや Z ボソンが介在している。重力相互作用は質量を持つ粒子間に働き、天体系などを形成する主要な力である。この重力相互作用は他の相互作用に比較して極めて微弱であるため、通常の素粒子物理学においては無視できる。なお 重力相互作用は、グラビトン (重力子) が介在していると考えられているが、現在まだ実験的に確証されていない。素粒子間の相互作用の強さを決める定数のこと結合定数 (coupling constant) という。この結合定数により、相互作用はつぎの 4 種類に分類される。

相互作用の種類	結合定数の大きさの程度	媒介するゲージ粒子
強い相互作用 strong interaction	10	グルーオン
電磁相互作用 electromagnetic interaction	10^{-2}	光子
弱い相互作用 weak interaction	10^{-14}	W ボソン, Z ボソン
重力相互作用 gravitational interaction	10^{-38}	グラビトン (重力子)

強い相互作用

ハドロン間の相互作用は強い相互作用に起因する。この相互作用ではハドロンの持つすべての量子数が保存される。すなわち量子数が保存されないような素粒子反応は禁止される。強い相互作用の根源はグルーオンというゲージ ボソンに起因している。強い相互作用によって起こる素粒子反応の一例を次に示す。

$$p + p \longrightarrow \pi^+ + p + n$$

量子数	$p + p$	$\pi^+ + p + n$
Q	$1 + 1 = 2$	$1 + 1 + 0 = 2$
B	$1 + 1 = 2$	$0 + 1 + 1 = 2$
L	$0 + 0 = 0$	$0 + 0 + 0 = 0$
S	$0 + 0 = 0$	$0 + 0 + 0 = 0$
I_3	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$	$1 + \frac{1}{2} + (-\frac{1}{2}) = 1$

電磁相互作用

荷電粒子と光子との相互作用であって、アイソスピン I を除く他の量子数は保存される。荷電粒子間に働く静電気力は、荷電粒子が互いに仮想光子を交換することによって生ずる。電磁相互作用による素粒子反応には、荷電粒子による光子の放出や吸収ならびに光子 (γ 線) によるハドロン生成などがある。電磁相互作用によって起こる素粒子反応の一例を次に示す。

$$\gamma + p \longrightarrow K^+ + \Lambda^0$$

量子数	$\gamma + p$	$K^+ + \Lambda^0$
Q	$0 + 1 = 1$	$1 + 0 = 1$
B	$0 + 1 = 1$	$0 + 1 = 1$
L	$0 + 0 = 0$	$0 + 0 = 0$
S	0	$1 + (-1) = 0$
I_3	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2} + 0 = \frac{1}{2}$

弱い相互作用

β 崩壊は弱い相互作用に起因する。レプトン間やハドロン間、ならびにレプトン・ハドロン間で作用し、パリティ P , アイソスピン I , アイソスピンの第 3 成分 I_3 は保存されないが、他の量子数についてはストレンジネス S を除けば常に保存する。ストレンジネス S は、レプトン間の弱い相互作用では保存するが、レプトン・ハドロン間においては保存する場合と保存しない場合とがある。またハドロン間の弱い相互作用では、 S は保存しない。弱い相互作用はレプトンやハドロンが W ボソンならびに Z ボソンというゲージ粒子を交換することによって生ずる。弱い相互作用によって起こる素粒子反応の一例を次に示す。

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (I_3 \text{ は非保存})$$

量子数	n	$p + e^- + \bar{\nu}_e$
Q	0	$1 + (-1) + 0 = 0$
B	1	$1 + 0 + 0 = 1$
L	0	$0 + 1 + (-1) = 0$
S	0	0
I_3	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2} \text{ (非保存)}$