

素粒子物理学と強い相互作用の歴史的概観

- 1891 ベクレル、ウラニウムから自然放射線を発見
- 1895 レントゲンによる X 線の発見
- 1897 J.J. トムソンによる、陰極線からの 電子の発見
- 1900 プランク、黒体放射において量子仮説を提唱
- 1905 アインシュタイン、光量子仮説・特殊相対性理論・ブラウン運動理論を発表
- 1909 ミリカンによる電子の電荷測定
- 1911 ラザフォードによる、原子核の発見と原子模型
- 1913 ボーア、量子化則を原子の構造に適用
- 1915 アインシュタイン、一般相対性理論を完成
- 1919 ラザフォードによる、初の人工的核反応と陽子の発見
- 1920 ラザフォード、中性子の存在を予言
- 1922 コンプトン、コンプトン効果を発見し、光の粒子性を示す
- 1923 ド・ブロイ、物質波の概念を提唱
- 1924 ハウシュミット、ウーレンベックによる、電子のスピン概念の導入
ボース、アインシュタインによる、ボース・アインシュタイン統計の提唱
- 1925 パウリ、排他律の提唱。ハイゼンベルグ、行列力学として 量子力学を定式化
フェルミによる、フェルミ統計の提唱
- 1926 シュレーディンガー、波動力学として 量子力学を定式化
ディラックらによる行列力学と波動力学の等価性の証明
- 1927 デビッソン、ガーマーによる電子の波動性の証明：粒子と波動の二重性
ハイゼンベルグによる不確定性原理の提唱
- 1928 ディラック、ディラック方程式を提唱し、陽電子を予言
ガモフによるアルファ崩壊の理論の提唱：量子力学の有用性の証明
- 1929 ハッブル、膨張宇宙論を提唱
- 1930 パウリ、 β 崩壊 のエネルギー収支の不一致から、ニュートリノを予言
- 1931 ディラック、マックスウェル方程式の双対性 と 電荷の離散性への説明から、
磁気単極子（モノポール）の存在を予言

- 1932 アンダーソンによる陽電子の発見。チャドウィックによる 中性子の発見
ランダウらの中性子星の予言。チャンドラセカール限界の発見
- 1933 ハイゼンベルグによるアイソスピン概念の提案
フェルミの V-A 理論：、4 フェルミ相互作用によるベータ崩壊の理論
- 1934 湯川の中間子論：核力の到達距離から 200 MeV 程度の中間子の存在を予言
- 1937 ミュー粒子の発見
- 1939 オッペンハイマー、ブラックホールの存在を予言
- 1947 朝永、シュウィンガー、ファインマンによる繰り込み理論と量子電磁力学
(QED) の完成。荷電パイ中間子 (π^\pm) の発見。ストレンジ粒子の観測
- 1950 中性パイ中間子 (π^0) の発見
- 1951 Λ 、 K^0 の発見
- 1953 西島、ゲルマンによる、ストレンジネスの概念の導入
- 1954 ヤン、ミルズ、内山、非可換ゲージ理論のヤン・ミルズ (YM) 理論を提唱
- 1955 ガモフによるビッグバン宇宙論の提唱。反陽子の発見
- 1956 リー、ヤン、弱い相互作用におけるパリティの破れを予言
坂田、田中による、坂田模型の提唱。反中性子の発見
- 1956 ライナス、コーワンによる、電子ニュートリノの発見
- 1957 ウー、弱い相互作用でのパリティ非保存を実験的に検証
- 1959 レッジエ、全てのハドロンを複合粒子として捉え、複素角運動量 l の 1 位の
極とみなすレッジエ理論を提唱
- 1961 南部、ジョナラシニオ、強い相互作用におけるカイラル対称性の自発的破れ
を提唱し、パイオンを 対称性の自発的破れに伴う (準) ゼロ・モードと同等
ゲルマン、ネーマンによる、八道説と呼ばれるハドロンの分類
- 1962 ゴールドストーン、南部・ゴールドストーンの定理として、対称性の自発的
破れが 必然的に ゼロ・モードの出現を伴うことを証明
レダーマンらによる、ミュー・ニュートリノの発見
- 1963 ゲルマン、ツヴァイク、クォーク仮説を提唱し、ハドロンの分類に成功
- 1964 ヒッグス、ゲージ理論の自発的破れにおける ヒッグス機構を提唱
中性 K 中間子の崩壊過程から、CP の破れを発見。 $\Omega^-(sss)$ の発見

- 1965 ハン、南部、 $\Delta^{++}(uuu)$ の統計性の異常さから、カラー量子数を導入
ペンジャス、R. ウィルソン、等方的な 3K 宇宙背景輻射を観測し、
ビッグバン宇宙論の観測的根拠を示す
- 1966 南部、カラー荷をチャージとする SU(3) の非可換ゲージ理論 (QCD) を提唱
し、ゲージ場 (グルーオン) を導入。この頃、ハドロン反応における
 s -チャンネルと t -チャンネルの双対性が実験的に明確になる
- 1967 グラショウ、ワインバーグ、サラム (GWS) による、SU(2)_L×U(1) の
電弱統一理論の提唱と中性カレントの予言
- 1968 パルサーとしての中性子星の発見
牧、中川、坂田によるニュートリノ振動の予言
- 1968 以降 太陽ニュートリノ・フラックスの測定と太陽ニュートリノの問題
- 1969 ビヨルケン、レプトンによる陽子の深非弾性散乱から、陽子の構造関数に
対するスケーリング則を発見。カラン・グロスの関係式の発見
- 1970 ベネチアーノらによる、ハドロンに対する 双対共鳴模型の提唱
南部、後藤によるハドロンに対する弦理論の提唱。ブラックホールの発見
グラショウ、イウロポーレス、マイアニ (GIM)、フレーバーを変える中性
カレント (FCNC) が非常に小さいことから、チャーム・クォークの存在と
その質量を予言し、最初の相殺機構である GIM 機構を提唱
- 1971 トーフフトによる、GWS 電弱統一模型の繰り込み可能性の証明
- 1972 ファインマンによるパートン模型の提唱
- 1973 中性カレントの発見
トーフフト、グロス、ウィルチェック、ポリッツァー、コールマンらにより、
量子色力学 (QCD) が、強い相互作用の基礎理論として確立
小林・益川理論：CP の破れから、素粒子が 3 世代以上あることを予言
- 1974 ティンらにより、チャーム・クォークの中間子である J/ψ 粒子の発見
K. ウィルソン、ポリヤコフによる格子 QCD 理論の定式化
ジョージアイ、グラショウ、大統一理論 (GUT) を提唱し、陽子崩壊を予言
ヴェス・ズミノによる、超対称性の提唱
南部、双対超伝導 (モノポール凝縮) 理論によるクォーク閉じ込め理論を提唱

- 1975 タウ粒子の発見。クォーク・ジェットの見
トフーフト、ポリヤコフ、大統一理論などの非可換ヒッグス理論において、
磁気単極子（モノポール）が存在することを証明
- 1977 フェルミ研究所における、ボトム・クォークの中間子（ウブシロン）の発見
アルタレリ、パリジ、QCD の発展方程式である DGLAP 方程式を定式化
（実は、1972 年に、グリボフ、リパトフが既に定式化）
- 1979 TASSO グループによる、グルーオン・ジェットの見
- 1980 クロイツによる、格子 QCD モンテカルロ計算の実行とその有効性の証明
- 1981 ニールセン・ニ宮の定理：格子上でフェルミオンの定式化の原理的困難
トフーフト、可換ゲージでの QCD にモノポールが出現することを証明し、
クォークの閉じ込めに対する双対超伝導理論の数学的基礎を与える
- 1983 ルピアによる ウィーク・ボゾン (W^\pm と Z^0) の発見
- 1985 グリーン、シュワルツ、スーパー・ストリング理論を提唱
- 1987 大マゼラン星雲での超新星爆発 SN87A が観測され、カミオカンデでの
ニュートリノの観測を機会に、ニュートリノ天文学の可能性
- 1989 CERN において、軽いニュートリノが 3 種類であることが実験的に検証：
素粒子が 3 世代であることが有力となる
- 1994 フェルミ研究所のテバトロンにおいて、トップ・クォーク発見
 $N = 2$ 超対称 YM 理論に対するザイバーク・ウィッテン理論：双対性の物理
- 1995 ポルチンスキーによる超弦理論での T 双対性と D ブレーンの発見
- 1997 マルダセナによる超弦理論での AdS/CFT 対応の発見
- 1998 スーパー・カミオカンデにおけるニュートリノ振動の観測：
ニュートリノが有限な質量を持つことが決定的となる
ウィッテンによる、AdS/CFT 対応を用いたヤン・ミルズ理論の定式化
- 2000 クレー数学研究所から (QCD の数学的解析を含む) ミレニアムの 7 問題
RHIC において、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 生成実験開始
- 2004 量子色力学における漸近的自由性の発見に対してノーベル物理学賞
- 2005 酒井・杉本による、超弦理論での AdS/CFT 対応を用いた QCD の定式化
- 2008 南部、益川、小林、ノーベル物理学賞受賞

素粒子・原子核物理学の特徴

1. 多くの研究者が、様々な角度から研究を行ない、知識の蓄積と理解の飛躍的発展を重ねた結果 形成された総合的学問である。特に、理論と実験の発見が互いに刺激し合い 互助的な影響の下に 発展してきた。

2. 重要な理論的展開や実験的発見が、4つの相互作用のそれぞれの分野において交互に起こっている。これは、物理学の総合的性格に由来するものであり、1つの分野の発展が他の分野にも刺激を及ぼすことが多いことから、それらが交差することで 相互的に発展している。

3. 理論面では、「数学的形式」と「物理的描像」とが相補的に展開し、体系的な理論体系を形成している。即ち、数学的形式がある程度整備されると、物理的描像の確立が必要になってくる。一方、物理的描像が或る程度確定してくると、今度はより定量的な記述が要求され、数学的形式の更なる展開が必要になる。数学的形式としては、特に、場の量子論、対称性とその局所的拡張であるゲージ原理、相対論的共変性、繰り込み可能性等が、理論の重要な指導原理になる。

4. ミクロな世界を記述する形式は、基本的には「量子論」である。その形式を、特殊相対論と適合する形で 推し進めていった結果、場の量子論が定式化され、最終的に、ゲージ原理と繰り込み可能性とを基軸とする現在の「標準理論 = 電弱統一理論 + 量子色力学 (Q C D)」に至った。

(湯川の偉業は、原子・分子よりも5桁も小さい、 $1\text{fm} = 10^{-13}\text{cm}$ 程度の世界である、原子核においても 尚、量子論が成立する事を信じ、それをを用いて果敢に原子核内の現象を記述しようとした点にある。)