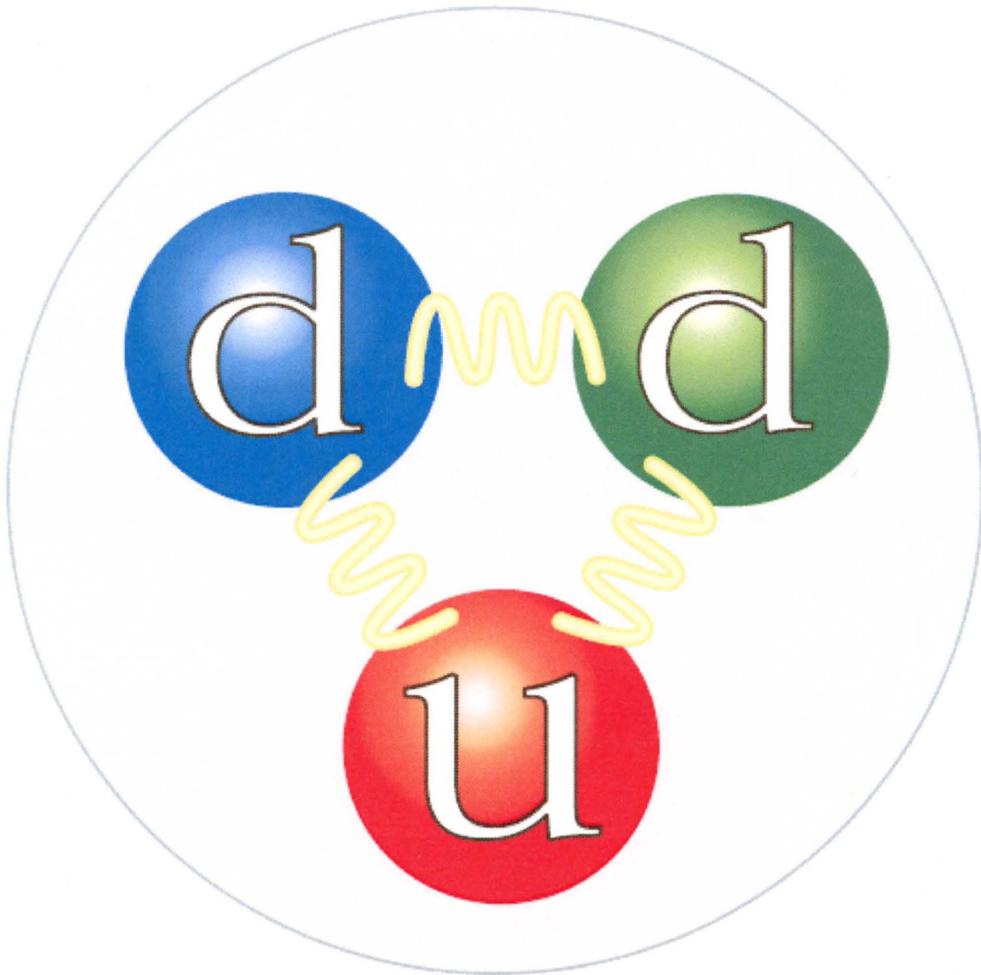


【「標準模型」の宇宙 現代物理の金字塔を楽しむ】



すべての物質は何かそれ以上分割できない素粒子とでも呼ぶべきものから出来ているのではないかという話は少なくとも古代ギリシャにまで遡ることができる。古代ギリシャではこうした考え方の旗手としてLeukipposやその弟子のDemokritosが有名であるが、この考え方は古代ギリシャでも主流であったとはいえ、長い間忘却の彼方に追いやられている。19世紀初頭になって化学者のJohn Daltonは近代的な意味での原子論を唱えているが、これが科学の世界で完全な市民権を得るには、20世紀を待たねばならなかった。統計力学の創始者であるBoltzmannは、原子論を擁護するために、極端な実証主義を信条とするErnst Machと激しい論戦を戦うことを強いられている。19世紀後半の話である。

20世紀初頭になって、やっと正に帯電した原子核の回りを負に帯電した電子が回るとい原子の描像が確立する。1904年に長岡半太郎が提唱した原子の土星型Modelは、発表当時はあまり注目されなかったが、1911年にErnest Rutherfordが提唱した原子模型とほぼ同等である。現在の我々は、電子は素粒子であるが、原子核は陽子と中性子からなることを知っている。陽子は1918年にErnest Rutherfordによって、中性子はさらに遅く1932年にJames Chadwickによって発見されている。原子核内の陽子と中性子の間には $\pi$ 中間子を媒介とした相互作用が働くが

(これは日本の湯川英樹によって理論的に予測された)、この核力(強い相互作用)は陽子と中性子を区別しない。つまり、陽子と陽子、陽子と中性子、中性子と中性子の間に働く力は等しい。陽子と中性子は質量も近く、核子という単一の実体が、或る時は陽子として現れ、或る時は中性子として現れるという考えに自然に誘われる。同じ神聖なる実体が、天竺(インド)には仏陀として現われ、日本には神道の神として現われたという神仏習合の考え方と同類である。数学では対称性は群でとらえられるが、陽子と中性子の対称性をとらえるために、Isospin空間という2次元の複素線型空間を内部空間として導入し、その計量と向きを保つ線型変換全体が作るSU(2)という群に注目する。核力についてはSU(2)不変ではないかというわけである。物理学者はこういう場合、“陽子と中性子が2重項をなす”といった言い方をする。この考え方は不確定性原理で有名なWerner Karl Heisenbergによるものである。

20世紀前半には陽子や中性子は素粒子と思われていたが、20世紀後半にこれらはQuarksと呼ばれる素粒子の複合体であることが判明する。標準理論というのは、電磁力、弱い力、強い力の3つの力を統一的に扱う理論であるが、それが可能になるためにはQuarksに辿りつくことが必要であった。その上の陽子や中性子あたりでとまっていれば、力が複雑すぎて、とてもこんな理論はできなかつたろう。Quarksは6種類あって(物理学者はRomanticにもこの種類をFlavor(香り)という用語で呼ぶ)、第1世代がu(p)とd(own)、第2世代がs(trange)とc(harm)、第3世代がt(op)とb(ottom)から成る。一説によると、第3世代のtとbは、それぞれtruthとbeautyを表すという話もある。物理学者はどこまでもRomanticである。ここで世代と言っているのは、化学者愛用の周期表にたとえると、周期のようなものだ。陽子は2個のuと1個のdからなる。中性子は1個のuと2個のdから成る。uは陽子の2/3の正電荷、dは電子の1/3の負電荷をもつので、

$$2/3+2/3-1/3=1, 2/3-1/3-1/3=0$$

となつて、電荷に関する帳尻は合う。通常我々が目にする粒子はすべて電子の電荷の整数倍の大きさにしか荷電していないのだが、Quarksは分数倍の電荷を持つ。湯川英樹はQuarksについて初めて聞いた時、“分数電荷の素粒子なんて、そんなもの存在するわけがない”と呟いたという。若い頃にEpoch-makingなIdeasを出した人が、次の世代が出してきた新しいIdeasを理解できないというのは、物理や数学ではよくある話である。陽子や中性子のように3個のQuarksからなる粒子はBaryonsと呼ばれる。これに対して、1個のQuarkと1個の反Quarkから成る粒子はMesons(中間子)と呼ばれる。素粒子論で粒子の名称の前に反が付くと、質量とSpinが等しいが、電荷の正負が逆転している粒子を指す。粒子と反粒子が衝突すると、対消滅を起こし、すべての質量がEnergyに変換される。

BaryonsとMesonsが一緒になつてHadronsと呼ばれる一族を形作る。Hadronsも1930年代前半には陽子と中性子ぐらいしか知られていなかったし、湯川の $\pi$ 中間子は仮説の域を出なかつた。それが1950年代あたりになってくると、その数も優に100を超えてくる。これらがすべて素粒子だとすると、物理学は化学になってしまうという危機感が、1960年代前半のMurray Gell-Mann等のQuarks模型の提唱につながっている。群という数学的構造を線型空間の変換群として表現して調べる学問を群の表現論というが、Quarks模型は、それまで無縁と思われていた群の表現論が素粒子論で重要な役割をはたす奔りとなるものである。もっともGell-Mann自身はQuarksを物理現象を説明するための数学上の虚構と思いついていた節があり、実験物理学者が実体としてのQuarksを追い求めるのを制止する側に回っている。しかし、こうやって制止されると逆に燃えてくるのが、実験物理学者の性というものである。1960年代後半Stanford加速器Center(SLAC)とMITの物理学者は陽子に高Energyの電子をぶつける実験をおこなっていた。予想に反し、電子が陽子から鋭い角度で跳ね返されるという現象に何度も遭遇している。これはとても大きなタピオカプリンの中に鉄球を投げ込んだら、自分に向かって跳ね返ってきたようなものである。プリンの中に硬くて小さい物体が浮いていると考えない限り、説明のつかない現象である。そしてこの硬くて小さい物体こそQuarksなのだ。このあたりの詳細は、数学と物理学、あるいは理論物理学と実験物理学の関係を考えるうえで大変興味深い。この実験を主導したJerome Friedman、Henry W. KendallそしてRichard E. Taylorは1990年にNobel物理学賞を受賞している。

物質を形作る素粒子は、Quarksだけでなく、電子に代表されるLeptonsと総称される素粒子群がある。前者は強い相互作用を受けるが、後者は受けない。Leptonsも3世代からなり、各世代

は負に帯電した粒子と電氣的に中性の粒子からなる。第1世代は負に帯電した電子と電氣的に中性の電子Neutrinoから成る。電子は現在素粒子として認められているものの中では古株に属するが、電子Neutrinosは1930年代に神童の誉れ高いWolfgang Pauliが $\beta$ 崩壊でEnergy保存則を救うためにヤケクソで導入した粒子である。その観測は1950年代まで待たねばならず、Frederick Reines等による。その功で、Reinesは1995年にNobel物理学賞を受賞している。Leptonsの第2世代は負に帯電した $\mu$ 粒子と電氣的に中性の $\mu$  Neutrinoから成る。前者はCarl David AndersonとS. H. Neddermeyerによって1937年に宇宙線の中から発見された。発見当初は、湯川によって予言されていた中間子と質量が近いことから、それではないかと誤解されたが、その誤解が解けた頃、中華料理店で食事中であった理論物理学者のRabiが言い放った“そんなもの、誰が注文したんだ”という台詞は今も語り草になっている。この台詞は、際限なく増えていく微粒子に対する物理学者の苛立ちを見事に表現している。Leptonsの第3世代は負に帯電した $\tau$ 粒子と電氣的に中性の $\tau$  Neutrinoから成るが、前者の観測は遅く、1975年にStanford線型加速器CenterのMartin Lewis Perl等による。この功により、Perlは先述のReinesと一緒に1995年にNobel物理学賞を受賞している。Neutrinosは質量が小さく、電氣的に中性で、受ける力といえば、もともと検出が難しい重力を別にすると、弱い相互作用だけなので、検出に手間取り、 $\mu$  Neutrinoは1962年にLeon Max Lederman、Melvin Schwartz、Jack Steinberger等によって、 $\tau$  Neutrinoに至っては世紀の変わり目の2000年にFermi研究所でやっと検出されている。Lederman等3人は1988年に $\mu$  Neutrinoの発見に対して、Nobel物理学賞を受賞している。

Microの世界を記述する量子力学では、粒子の記述は(実数値ではなく)複素数値をとる波動関数で表される。量子力学は本質的に確率的であるが、この確率は複素数値の絶対値の二乗であらわされるので、もともと位相分だけの冗長性を持っている。つまり位相は全く実験的検証にかからないのだ。ここで“位相”と言っているのは、物理学者特有の用語で、複素数は絶対値と偏角で記述されるが、その偏角のことを指している。従って、各点で群U(1)に属する変換をおこなっても物理的には何も変わっていないはずだ。したがって現象を支配する法則というか方程式は、こういう変換に対して不変な形であるべきである。これが現代物理学で主流となっているGauge理論の基本的な考え方だ。現代物理学では系はLagrangianで記述されるが、自由粒子を表すLagrangianが各点でのU(1)での変換で不変であることを要求すると、自然に量子電磁気学に導かれる。もっとも歴史的にはこういう形で量子電磁気学が導入されたわけではなく、終戦間近の日本の朝永振一郎に負うのだが、戦争中という特殊な事情で海外への発信が遅れ、戦後ほどなく朝永とは独立に量子電磁気学の取り扱いに成功したアメリカのJulian Seymour SchwingerとRichard Phillips Feynmanも量子電磁気学の創始者ということになっている。この3人は1965年にその功により、一緒にNobel物理学賞を受賞している。

Gauge原理の導入は量子電磁気学よりだいぶ遅れ、1954年の話である。導入した二人の名前をとって、Yang-Mills理論と呼ばれる。Gaugeという用語を最初に導入したのは数学者のHermann Weylで、1918年の話である。Weylは物理学の方程式について、奥の奥まで考察した数少ない数学者の一人で、電磁力がGauge力に他ならないことを最初に理解したのは彼だった。電磁気学で直接実験的検証にかかるのは電場と磁場の強さであるが、Maxwellの理論でScalar PotentialとVector Potentialを一緒にして、これに対して電場と磁場を変えないような変換に対するGauge理論を作ると、古典的な電磁気学が得られる。WeylはEinsteinと、電磁場と重力場の統一場理論を作るという理念を共有しており、この方向で統一場理論を作ることを目指したのだが、出来上がってきたものは、物理の理論としては、大失敗だった。ひとつの物体の長さが、それが辿る経路に依存するという超過激な話で、もちろん自然の実験とは一致しない。このWeylの仕事に対するEinsteinのCommentはなかなかふるって、

“現実との一致がないこと以外は、ともかく見事な知的成果です”

というものだった。このあたりの話し、なにか最近の紐理論を彷彿させるものがあると言ったら叱られるだろうか？量子力学が形を整えるのは1920年代半ばであり、WeylがこれにGauge原理を適用していれば、量子電磁気学の創始者になっていても不思議ではないのだが、このあたりは歴史は筋書きのないDramaということなのだろう。

Gauge原理で電磁力はとらえられるが、20世紀になって発見された弱い核力と強い核力に対して同様のことをするためには、Gauge原理と並んで現代物理学の基本原則となっている自発的な対称性の破れという考え方が必要になる。なぜならGauge原理から出てくる力はすべて長距離力であるが、弱い核力も強い核力もいずれも短距離力なので(そのために我々がこれらの力を認識するのに、20世紀を俟たねばならなかった)、これらの力の到達距離を制限しているMechanismが必要になる。自発的な対称性の破れを一言で説明するのはなかなかむずかしいのだが、人間でも生まれて間もない赤ん坊はすべて同じようなもので、その意味では赤ん坊間に高度な対称性が成り立っているのだが、だんだん年数が経つと個人差が明瞭に出てきて、その対称性は破られてしまっている。あるいは同じようなたとえだが、日本という国家に所属する人間はすべて法の前では平等ということになっていて、高度の対称性が成り立っているはずである。しかし、これは理念としての平等で、実際には貧富の格差もあるし、差別もある。したがって、平等は、そして対称性は破られている。まあそんな話だと思ってもらえればいい。自発的な対称性の破れをGauge原理と組み合わせるといふ考え方は、1960年代前半に、まずBrusselのFrancois EnglertとRobert Broutが、数ヶ月遅れて彼らとは独立にEdinburgh大学のPeter Ware Higgsの3人が考えたもので、本来であれば、EBH機構とでも呼ばれるべき代物と思われる。しかし、どういうわけかそのうち最後に考えたPeter Ware Higgsの名前をとって、Higgs機構と呼ばれる。自発的な対称性の破れの結果として存在することになる粒子はHiggs Bosonsと呼ばれるが、これが本当に存在するならば、遠からずCERN(欧州原子核研究機構)あたりで確認されるはずで、その折にHiggsが存命であれば、間違いなくNobel物理学賞を受賞することになると思われる。

電磁力、弱い力、強い力のいずれもがGauge原理で捉えられるという話は理論素粒子物理学の金字塔といって差し支えなく、この本の題目である標準理論の屋台骨をなしている。もうひとつ言っておくと、物理のGauge原理は、数学のほうのFiber Bundlesの理論に照応し、これらがお互いの存在を意識することなく、ほぼ同じ頃(20世紀の半ば)に作り出されたというのは、なかなか面白い話である。程なく両者が同じIdeaであることがわかるのであるが。

同じ原理でとらえられるとなれば、次にこれらを統一したいと思うのは人情である。電磁力と弱い力は電弱力として統一されるという話は、1960年頃にアメリカのSheldon Lee Glashowによって提唱され、アメリカのSteven WeinbergとパキスタンのAbdus Salamがそれぞれ独立に1967年にWeinberg-Salam理論として結実させた。この3人はその功により、1979年にNobel物理学賞を受賞している。次にくるのは電弱力に強い力を加えた大統一という話になるはずであったが、このあたりから理論素粒子物理学は段々おかしくなり始め、その迷走は現在まで続いている。大統一のもっとも簡単な候補はSU(5)対称性であるが、これは3つの力を統一するのみならず、QuarksとLeptons(電子とNeutrinos)を統一し、標準Modelのすべてを説明し、それまで恣意的とみられていたものを必然とする。そしてまともな物理学理論が持たなければいけない新しい現象の予測も行う(紐理論は残念ながらこれを欠いている)。SU(5)対称性が成り立つとすれば、Quarks、電子、Neutrinosは同一の粒子の異なる現れ方となり、特にQuarksは電子とNeutrinosに崩壊することを予測する。これは見事な予測で、Quarksを含む陽子はもはや完全に安定とはいけなくなり、陽子はいずれ陽子でなくなるはずである。この予測に飛びついた実験屋の一人が後にNobel物理学賞を受賞する小柴昌俊で、彼はこのために今は誰でも知っているカミオカンデを立ち上げる(1983年に完成)。SU(5)対称性が成り立っているとすれば、陽子崩壊は1年に数個は検出されるはずであったが、残念ながら今に至るまで、陽子崩壊は観測されていない。余談であるが、小柴というのは強運な男で、本来であれば、実験をしましたが期待される現象は観測できませんでした、で終わる話だったのだが、1987年に超マゼラン星雲で起きた超新星爆発で放出された大量のNeutrinosのひとつを偶然にも検出してしまった。これが小柴昌俊を宇宙線物理学の草分けとし、2002年のNobel物理学賞の受賞理由となっている。

是非本書を手にとりて20世紀の最高のIntellectual Achievementsである標準理論の考え方とそこにいたる壮大なDramaを満喫していただきたい。物理や数学に興味のある人もそうでない人も、21世紀を生きる人間としてこれぐらいの話は心得ておいたほうがいい。

H. Nishimura(文責)