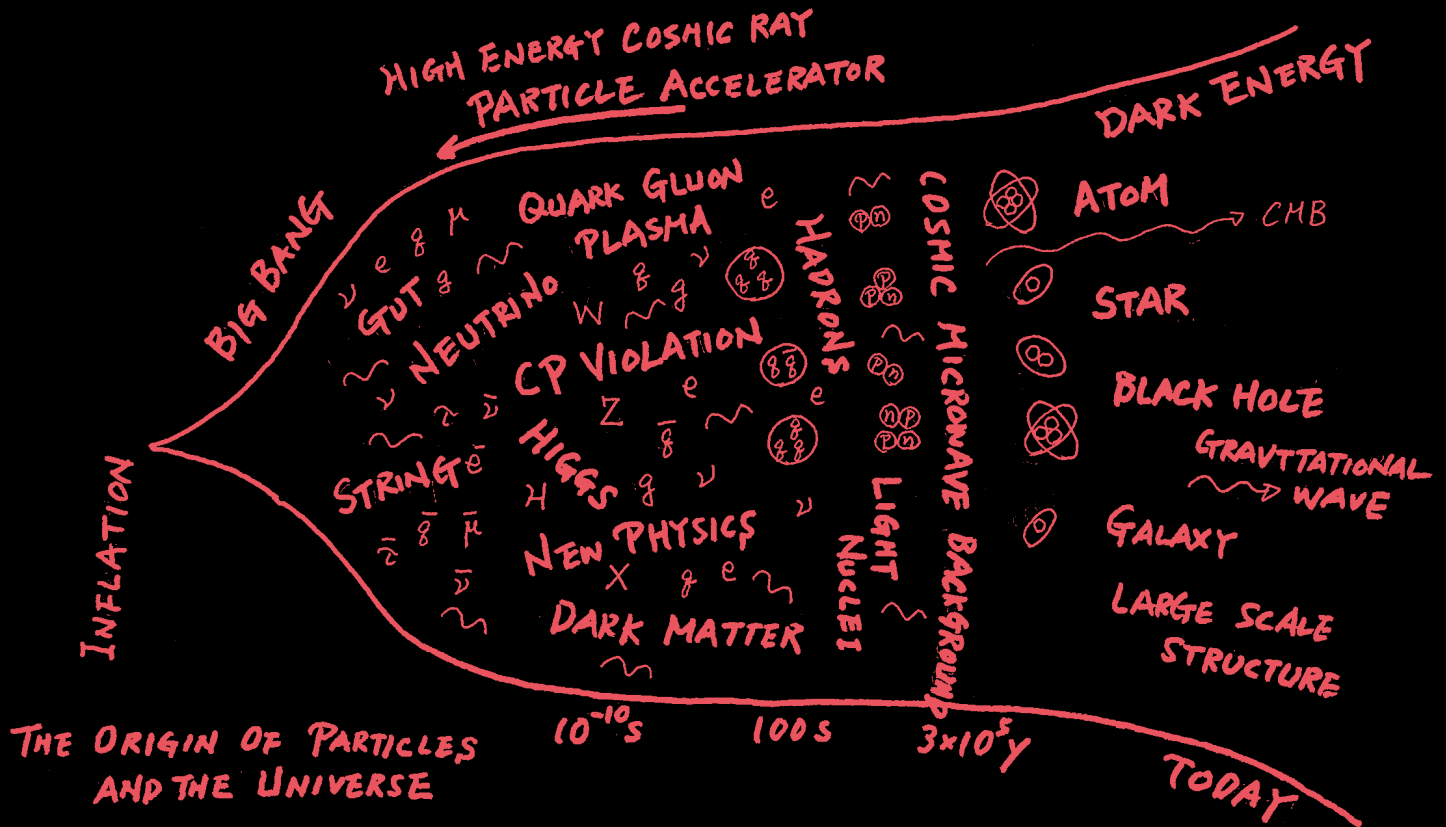


KMI Unfolded

Issue 2 / 2022
www.kmi.nagoya-u.ac.jp



KMI - Kobayashi-Maskawa Institute
for the Origin of Particles and the Universe

素粒子宇宙起源研究所



理論物理屋から見た小林・益川論文の素晴らしさ

棚橋誠治(名古屋大学理学研究科・素粒子宇宙起源研究所)

この論文、長さは、たったの6ページです。でも、理論物理の考え方のエッセンスがいくつも詰められているスゴイ論文です。少しずつ、読んでいきましょう。まず、冒頭からスゴイのです。“When we apply the renormalizable theory of weak interaction to the hadron system,..” 「くりこみ可能な弱い相互作用の理論をハドロンに適用すると」と、さらっと、書いてあります。でもこれ、実はとても勇気のいる「適用」です。当時、ハドロンの世界は混沌としていてよくわかっていませんでした。その混沌とした世界を、出来たばかりの「くりこみ可能な弱い相互作用の理論」という武器を使って敢然と解き明かそうとする。理論物理の醍醐味です。当時、ハドロンの世界がどのくらい混沌としていたか、実は、この小林・益川論文からも読み取れます。よく、「小林・益川理論によって、クォークの種類が6種類以上存在することが示された」という解説がありますが、実は、小林・益川論文のどこにも“quark”(クォーク)という単語は書いてありません。当時は、ハドロンがクォークからできているという考えは、まだ広く受け入れられてはいませんでした。小林・益川論文ではクォークが6種類とは言っておらず、ハドロンを構成しているなんらかの素粒子(今でいうクォーク)の種類が6種類以上あれば、CPの破れが起きうることを証明しているのです。ハドロンの世界がどのくらい混沌としていたか、これでお判りいただけるのではないのでしょうか。

小林・益川論文の素晴らしさはこれだけに止まりません。論文の主張がきわめて明快かつ具体的で、読者に誤解の余地を与えません。わずか4行のアブストラクト(概要文)には、“In a framework of the renormalizable theory of weak interaction, problems of CP-violation are studied. It is concluded that no realistic models of CP-violation exist in the quartet scheme without introducing any other new fields. Some possible models of CP-violation are also studied.” 「CPの破れの問題をくりこみ可能な弱い相互作用の枠組みにおいて調べ

る。現実的なCPの破れ模型を構築するためには、4元模型に新粒子(場)を追加せねばならないことが結論される。CPの破れを引き起こす可能な拡張のいくつかの例を示す。」と書かれており、論文の問題設定、結論、発展的主張がそれぞれ短い1センテンスに明快に記述されていることが分かるでしょう。ここまで簡潔で明快に主張が記述されているアブストラクトは、まさに神業です。

物理学研究としての小林・益川論文の優れている点は、もっとももっとあります。私がこの論文をはじめて読んだとき、もっとも感銘を受けたのは、あらゆる論理的可能性が検討しつくされていることでした。小林・益川論文の2ページ目以降を読むと、くりこみ可能なハドロン4元模型(2世代模型)といっても、3かける3の9通りに分類できることが示されており、それらのひとつひとつに渡ってCPの破れの有無とセミレプトニック崩壊事象との無矛盾性が仔細に検討されていることに気づきます。思いつきのひとつの可能性がうまくいかないことを示しているのではなく、2世代模型に関する一種のNO GO定理(成立が不可能であること)が主張されているのです。あらゆる可能性を検討し尽くした後に真実に到達するという科学研究の醍醐味を感じませんか? 2世代模型に関するNO GO定理を証明したあとから始まる5ページ目以降の議論はさらに圧巻です。ノーベル賞を受賞した6元模型(3世代模型)だけでなく、拡張ヒッグス模型や拡張ゲージ模型など、論理的に考えうるくりこみ可能なCP破れ模型の可能性のすべてが列挙されていることに気づくでしょう。

小林・益川論文の素晴らしさやこの論文を読んだときに感じる感動は、まだまだ伝え尽くせません。もしあなたが研究者を目指す学生で、まだ一度も小林・益川論文を読んだ経験がないのであれば、あなたはとて損をしています。教科書で学習するだけでなく、良い原論文を自分自身で読むことで得られる感動はなにものにも換えられません。ぜひ、小林・益川論文の美しさに触れ、自分自身の将来の研究の糧として学んでみてください。

小林・益川両博士は、1964年にK中間子の崩壊で発見されていた粒子と反粒子の対称性の破れ(CP対称性の破れ)を説明可能な理論を探り、当時知られていなかった第3世代の素粒子が存在すれば説明可能なことを示しました。この論文が発表されたのは1973年ですが、その検証には実に約30年にもわたる実験研究者の努力が必要でした。特にトップクォークは、日本の高エネルギー加速器研究機構(KEK)に建設されたトリスタン加速器で発見を目指したものの、予想以上に質量が大きいたがその後の研究で判明し、より高いエネルギーが得られる米国のテバトロン加速器でようやく発見されました(1995年)。また、タウニュートリノの確認には、加速器だけでなく粒子の反応点を精密に測る技術が必要で、名古屋大を中心とするチームが独自の原子核乾板技術を駆使して実現しました(2000年)。一方、小林・益川理論の説明どおりにCP対称性が破れていることを確認するには、第3世代素粒子のボトムクォークで構成されるB中間子とその反粒子である反B中間子の間での対称性の破れの測定が有効であることが三田一郎氏らによって指摘されました。しかしながら、そのためには、当時の加速器の1000倍も高い衝突頻度(ルミノシティ)が得られる加速器と、寿命が約1.5ピコ秒しかないB中間子の崩壊を精密に計測できる、当時としては夢のような実験技術が必要でした。日本では、トリスタンの後続としてBファクトリー計画が立ち上がりましたが、この加速器KEKBは、周長約3km



Belle IIコラボレーション／©Belle II/KEK

リング内で数千もの電子と陽電子の塊(バンチ)を非対称なエネルギー(電子ビーム8GeV、陽電子ビーム3.5GeV)で衝突させる野心的なものです。多数バンチの衝突により高ルミノシティを得るとともに、非対称



エネルギー衝突によりB-反B中間子系を電子ビームの方向に高速で運動させて見かけの崩壊寿命を延ばし、これを最先端の粒子検出器Belleで測ることで必要な測定精度が達成できます。実験は1999年に始まりましたが、当初は高いビーム電流による問題が次々に発生、さらに米国のBaBar実験との激しい競争の中でようやく2001年にB中間子崩壊でのCP対称性の破れを確認しました。さらにその後の測定でこの対称性の破れが小林・益川理論と整合することも定量的に確かめ、これが決定打となって、両氏の2008年ノーベル物理学賞受賞に繋がったのです。

しかし、これで話が終わったわけではありません。私たちは現在、Bファクトリーの50倍のデータ蓄積が可能なスーパーBファクトリー(SuperKEKB/Belle II)実験をKEKで進めています。この実験では、B中間子の様々な崩壊をより高精度で測定することにより、標準理論からのずれや標準理論では起こらない反応を見つけることを狙っています。1964年のCP対称性の破れの発見の驚きを契機に素粒子物理学が進歩してきたように、スーパーBファクトリーでの驚くような発見が、標準理論を超える新しい物理の発展に繋がることを期待しています。

実験屋から見た小林・益川理論の検証

飯嶋 徹(名古屋大学素粒子宇宙起源研究所／Belle II実験スポークスパーソン)

ひとつの物理研究分野は、ひとつの論文だけで完結できるものではありません。優れた研究は、多数の研究者を触発し、たくさんの後続の関連研究が行われることでひとつの分野として確立されます。この意味で、被引用数の多さは優れた物理研究であることを示すひとつの指標です。しかし、論文出版直後には、多くの研究者がその発展性や重要性に気づくことができない極めて先進的な内容を持つ研究論文も数多くあります。実は、現在の素粒子標準理論を確立したふたつの論文、S. Weinberg, “A Model of Leptons”(出版1967年。以下、ワインバーグ論文)と、M. Kobayashi and T. Maskawa, “CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction”(出版1973年。以下、小林・益川論文)は、ともに、このような先進的な論文の代表的な例です。ここでは、これらふたつの偉大な論文が、出版後いつの時点でどのようなきっかけで多くの研究者がその重要性に気づくに至ったか、年ごとの引用数データを見ていきましょう。

これまでの総被引用数13,319のワインバーグ論文は、1967年の出版後、1970年までの4年間でわずか3の被引用数という、あまり注目を浴びていない論文でした。とはいうものの、益川先生や小林先生は早い時期からワインバーグ論文に興味を抱かれていたようです。ワインバーグ論文の転機は、1971年に訪れます。G. 't Hooftが1971年に非可換ゲージ理論のくりこみ可能性を証明し、S. Weinberg自身がその物理的意義を解説する論文を書くことで、1972年以降は爆発的に引用数が伸びていったのです。

小林・益川論文(総被引用数10,987)もワインバーグ論文の爆発的な被引用数増加の最初の時期である1972年に書かれ1973年に出版された論文ですが、その出版直後にはあまり注目を浴びない論文でした。1974年までの小林・益川論文の被引用数はわずか2にすぎません。ただ、この時期から岩崎洋一先生(筑波大学元学長)や、菅原寛孝先生(KEK元機構長)は小林・益川論文に触発された

ワインバーグ論文の引用数

(1967出版 | 総被引用数13,319)

1967: 0
1968: 1
1969: 1
1970: 1
1971: 9 ← 't Hooft renormalizability
1972: 92
1973: 167



小林・益川論文の引用数

(1973年出版 | 総被引用数10,987)

1973: 1
1974: 1
1975: 5 ← Pakvasa-Sugawara
1976: 35
1977: 76



研究を模索していらっしゃったとのことです。1974年11月におきた素粒子11月革命(J/ψ 粒子の発見)と、1975年に出版された論文 S. Pakvasa and H. Sugawara “CP Violation in the six-quark model”によってその当時知られていたCP対称性の破れが小林・益川理論で説明できることが示されたことが、小林・益川論文の被引用数の爆発的増加のきっかけになりました。

物理学研究における被引用数は研究の重要性の指標ですので、研究の流行に敏感になることは重要です。しかし、すでに起きている流行だけを追っているとあらたな潮流を生み出すことはできません。ワインバーグ論文や小林・益川論文の被引用数の推移は、流行が始まる前に重要な研究の端緒をつかむことの重要性を教えてくれるように思います。

この記事でとりあげたワインバーグ先生と益川先生は、2021年7月23日、奇しくも、同じ日にお亡くなりになりました。大きな悲しみにたえません。心から哀悼の意を申し上げます。

引用数データから見る小林・益川論文

HISTORY OF KOBAYASHI-MASKAWAについて

これは、小林・益川両教授による論文“CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction”(1973年出版)が生まれた背景とその発展をまとめた「小林・益川理論の系譜図」です。

この系譜図には3つの時代が描かれています。素粒子物理学黎明期は1930年前後にさかのぼり、混沌とした素粒子物理学が徐々に体系化され「素粒子標準理論」が構築されました。小林・益川理論も素粒子標準理論の重要な一角です。小林・益川理論発表の翌年、11月革命とも呼ばれる1974年のJ/ ψ 粒子(チャームクォーク)の発見以降は、標準理論の検証に主眼が置かれる時代になります。そして2012年のヒッグス粒子発見をもって標準理論で予言

された全ての粒子が出揃い、私たちは現在、新物理探索の時代に突入しています。

系譜図に引かれた数多くの線は、既知の実験事実を説明し過去の理論を補完する新理論、新理論の実験的検証、未知の現象を予言する理論研究などの、研究のつながりを表したものです。紙面の制限で全ての結びつきを細やかに表現することが叶いませんでしたが、同じ時代に複数の研究をつなぐ横の線がある一方で、数十年もまたいで縦に伸びる線もあります。

小林・益川論文を題材にしたこの系譜図を通して、国境・時間・理論と実験の垣根を越えて学問の言葉で刺激し合い、時に熾烈な競争を交えながら、力を結集して知の境界を押し広げる学術研究の営みを皆さまにお伝えできれば幸いです。



What is the origin of matter and the universe?

宇宙の - 我々の - 起源とは？

宇宙は何からできているのか、時空の起源とは、物質はどこから生まれたか、

そして、万物を支配する法則はあるのか。

KMIは、長年人類が追いかけてきた

これらの問いの答えを見つけるための組織です。

KMI 名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所

Kobayashi-Maskawa Institute for the Origin of Particles and the Universe

〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町

www.kmi.nagoya-u.ac.jp



KMI Unfolded Issue 2 / 2022

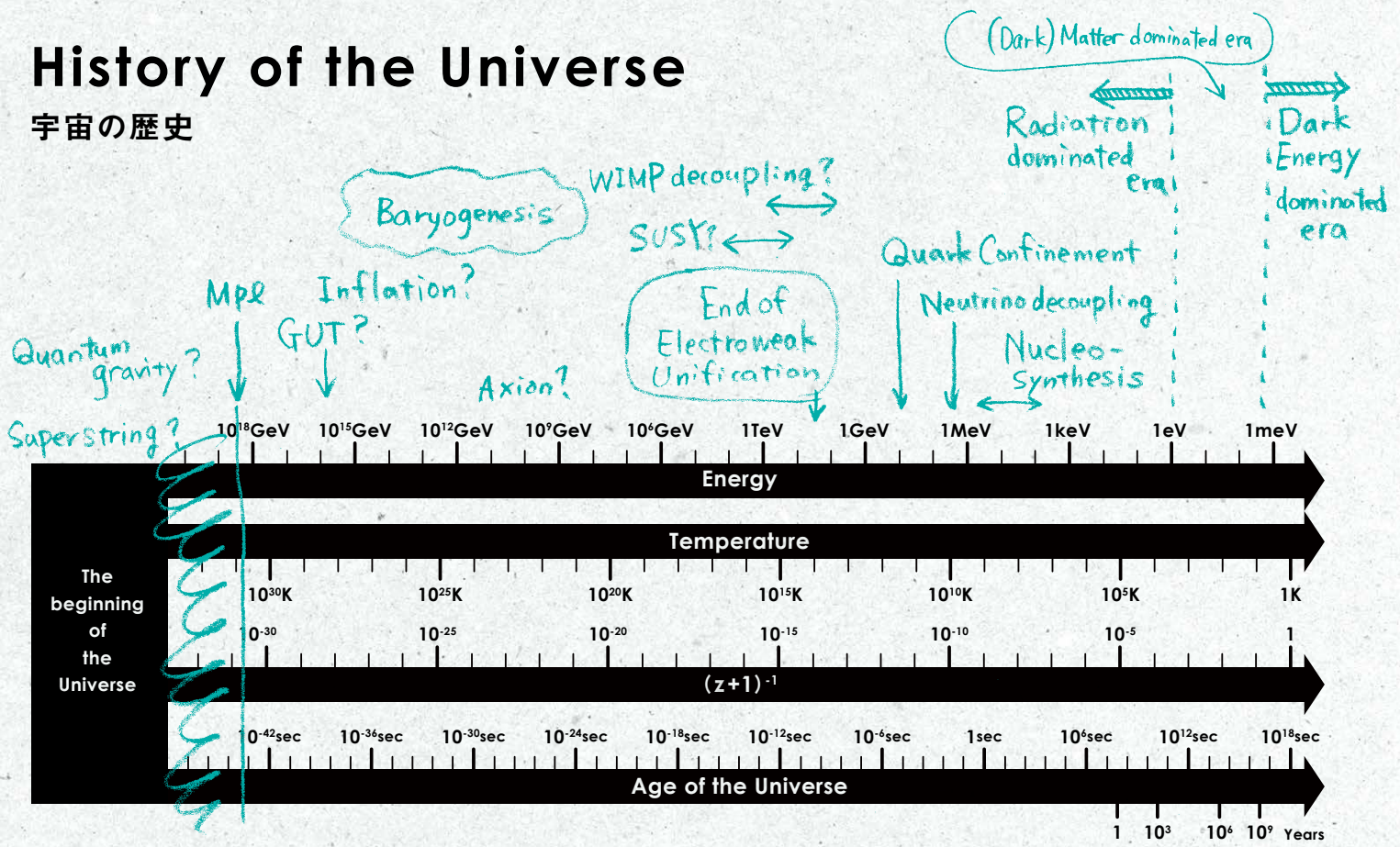
Editors: Azusa Minamizaki and Masaharu Tanabashi

Design: opportune design Inc.

2022年1月発行 ©2022 KMI/Nagoya University

History of the Universe

宇宙の歴史



Redshift Parameter

$$z = \frac{a_0}{a} - 1$$

a: scale factor
 $a_0 = a(t_0)$

