

2007年8月22日

独立行政法人 理化学研究所

国立大学法人 名古屋大学

米国コーネル大学

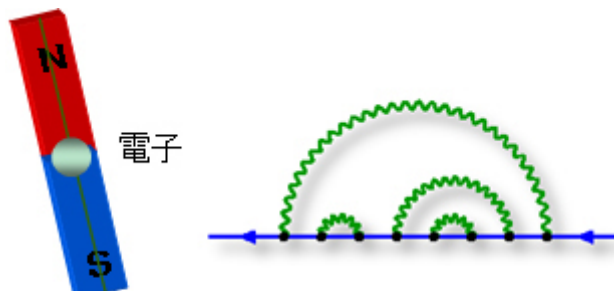
電子の磁石の強さを1兆分の1の精度まで計算

- 電磁気力の強さを示す微細構造定数を精密に決定 -

電磁気的な力は、実験室の中でだけ見受けられるものではなく、物の色や手触りなどの日常の現象や、様々な化学反応、そして原子の構成に至るまで、私たちの身のまわりの現象のほとんどを担っています。この力の引きおこす現象は、ミクロな視点からは、量子電気力学(QED)によって説明されています。素粒子のひとつである電子の磁性も、また、QEDによってとても高い精度まで調べられており、これまでの実験で得られた高精度の測定値と照らしあわせることで、QEDの正しさを検証するものとなりました。

理研・川合理論物理学研究室と、名古屋大学、米国コーネル大学の共同研究グループは、この電子の磁性の強さを表すg因子と呼ばれる数を、QEDにより1兆分の1の精度まで計算することに成功しました。今回、研究グループは、計算を数值的に行う手法を改良し、さらにコンピュータを用いてすべての計算手順を自動化する方法を開発しました。このシステムを利用してこれまでの理論計算を検証した結果、光子4個による寄与が訂正され、同時に、QEDに基づく理論計算はより信頼できるものになりました。

実験による電子g因子の測定値は、2006年の米国ハーバード大学のグループによるものです。この結果と今回の理論計算から、微細構造定数 α の値が $\alpha=1/137.035999070(98)$ と世界最高精度で求められました。 α は自然界の基本定数の一つで、電磁気力の強さを表す定数です。もし、 α がわずかでも違った値であったとすると、私たちの世界は今とは全く違うものになっているはずですが、自然の姿を形作る電磁気力についての私たちの理解は、 α の精度まで進んだと言えるでしょう。



(左図) 電子は電荷を運ぶだけでなく、磁石としても振舞う

(右図) 研究グループが用いた視覚的な計算図 (ファインマン図)

2007年8月22日

独立行政法人 理化学研究所

国立大学法人 名古屋大学

米国コーネル大学

電子の磁石の強さを1兆分の1の精度まで計算

- 電磁気力の強さを示す微細構造定数を精密に決定 -

◇ポイント◇

- 電子の磁石としての強さを量子電気力学（QED）理論により計算
- 計算過程をすべて自動化し、理研スーパーコンピュータで計算を実行
- ハーバード大学の実験結果と今回の成果から、世界最高精度で微細構造定数を決定

独立行政法人理化学研究所（野依良治理事長）、国立大学法人名古屋大学（平野眞一総長）、米国コーネル大学（ディビッド J. スコルトン学長）は、1個の電子が持っている磁石の強さを1兆分の1の精度まで計算することに成功しました。これは、磁石の強さを示すg因子^{*1}の値を決める理論式のうち、光子^{*2}4個による寄与を従来の計算と独立に評価し、新たに決定し直したものです。その結果、2006年の米国ハーバード大学によるg因子の実験の測定結果とあわせて、電磁気力の強さを示す微細構造定数 α ^{*3}は1/137.035999070（98）と定まり、最後の3桁の数字が変更されました。これは、仁科加速器研究センター（矢野安重センター長）川合理論物理学研究室の青山龍美客員研究員（現在は大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構研究員）ほか3人の共同研究による成果です。

本研究グループは、量子電気力学（QED）^{*4}の摂動計算^{*5}を数値的に行う手法として米国コーネル大学の木下東一郎教授（ゴールドウィン・スミス名誉教授）が開発した方法をさらに改良し、計算のすべての過程をコンピュータで自動的に実行できるようにしました。理研のRSCCスーパーコンピュータでの数ヶ月にわたる計算によって得た新しい結果を、2005年に得た結果と比較検討したところ、以前の計算の誤りが判明しました。これを訂正すると、2つの独立な計算の結果は一致し、理論式の形が光子4個の寄与を含む項まで確定しました。これは、ハーバード大学でのg因子の実験結果の精度である約1兆分の1に匹敵します。

電子のg因子の実験と今回の理論式から決めた微細構造定数 α の値は、他のどの方法で決めた値よりも高い精度を持っており、世界標準値となる予定で、理科年表をはじめ各教科書の値が変更されることとなります。電磁気力に起因する現象は、物の色や香りにはじまり、タンパク質の形、金属やナノ物質の特性、化学反応、原子の形成など多岐にわたります。その強さを示す α を知るということは、私たちが自然現象の根源を、 α の精度と同じ深さまで理解するということを意味します。

本研究成果は、米国の科学雑誌『*Physical Review Letters*』（9月14日号）に掲載されるに先立ちオンライン版（9月12日付け：日本時間9月13日）に掲載されます。

1.背景

電子の磁石としての性質を磁気能率^{*6}と呼びます。この磁気能率の強さは、ボー

ア磁子^{*7}を磁性の単位として、その何倍になっているかで表し、これをg因子と呼びます。電子のg因子の大きさは、物理理論の2本柱である特殊相対性理論^{*8}と量子力学^{*9}を融合してできたディラックの理論^{*10}によると、正確に整数の2の値を示すはずですが、ところが、実際にg因子の大きさをガリウム原子のスペクトル線の測定から決定してみると、2から0.1%程度ずれていることが、米国の実験物理学者P.クッシュ（1955年ノーベル物理学賞受賞）らにより1947年に発見されました。このg因子の2からのずれを異常磁気能率^{*11}と呼び、その原因を探るとともに、gの詳しい値を決めるための理論と実験の双方による研究が始まりました（図1）。

翌1948年にこの異常磁気能率の原因が、電子と光子との相互作用（図2上）にあると看破し、量子電気力学理論（Quantum Electrodynamics または QED）によってその値を計算してみせたのが、米国の理論物理学者J.シュウィンガーです。ディラック理論と異なり、QEDでは、量子的なゆらぎによって、電子が仮想的な光子を放出し、再吸収する効果が生じます（図2下）。この効果が、弱い磁場中にある電子のg因子に、2からのずれを生じさせます。一方、日本の理論物理学者朝永振一郎のグループと米国の理論物理学者R.P.ファインマンは、水素原子中にある電子が受ける仮想光子からの影響を計算し、水素原子の「ラムシフト」と呼ばれるエネルギー準位差の原因を説明しました。シュウィンガー、朝永、ファインマンの3人はQEDの成立への貢献によって1965年にノーベル物理学賞を共同受賞しています。

1987年には、米国の実験物理学者H.G.デーメルトらワシントン大学のグループが、1個の電子を金属筒内の電磁場に閉じ込め、異常磁気能率を精密に測定することに成功しました。彼らの得たg因子の値は、1千億分の1の精度で、11桁の値が得られたこととなります。デーメルトはこの功績で1989年にノーベル物理学賞を受賞しています。

昨年、2006年になって、ハーバード大学のG.ガブリエルスらは、デーメルトらの値よりもほぼ1桁、g因子にして1兆分の1の精度で、異常磁気能率を測定することに成功しました。具体的には、

$$g/2=1.001\ 159\ 652\ 180\ 85\pm 0.000\ 000\ 000\ 000\ 76$$

で、この測定に成功するまで、ガブリエルスは実に20年を費やしています。この成果はAmerican Institute of Physics（米国物理学協会、以下AIP）が選ぶ2006年のThe Top Physics Storyに選定されています。

このように実験の精度が上がるにつれ、理論計算もより高い精度が要求されてきます。QEDでは、電子の間で仮想光子を交換することで電磁気力が伝播すると考えます。1個の仮想光子を交換する効果は微細構造定数 α に比例することが知られており、 α は電磁気力の強さを示す定数そのものとなります。 α の値は約1/137と小さな数であるため、交換する光子の数が多い過程ほど、磁気能率に対する寄与は小さくなります。g因子を α の多項式

$$g=2+2\times (A_1^{(2)}(\alpha/\pi)+A_1^{(4)}(\alpha/\pi)^2+A_1^{(6)}(\alpha/\pi)^3+A_1^{(8)}(\alpha/\pi)^4+\dots) \quad \dots (1)$$

式で表し、 α の係数 $A_1^{(2)}$ などをQEDの理論計算により求めていきます。したがって、理論からのg因子の予言値の精度を上げるには、多くの光子を交換する過程を計算する必要がありますということになります。

ところが、 α の次数を上げると、計算は格段に難しくなります。例えば、 α の1乗の項の寄与、J.シュウィンガーが得た $A_1^{(2)}=1/2$ は、1個のファインマン図^{*12}（図2下）

のみを計算すればよく、現在の洗練された計算方法を使用すれば、ノート 1 ページぐらいの紙に鉛筆で計算できる量ですみます。次に、 α の 2 乗項に対応する $A_1^{(4)} = -0.328\ 478\ \dots$ は、7 個のファインマン図の寄与を足し合わせたもので、一人の人間が紙と鉛筆だけで正しく計算できる限界に近い計算となります。さらに、 α の 3 乗項に対応する $A_1^{(6)} = 1.181\ 241\ \dots$ は 72 個のファインマン図が寄与し、米国で木下教授らがコンピュータによる計算を行い、1974 年に最初の数値計算の結果を得ました。

α^4 (α の 4 乗) の項 $A_1^{(8)}$ には 891 個のファインマン図形が寄与します。これらを計算する数値計算プログラムは、すべてをあわせると約 20 万行にのぼり、1981 年に木下教授らが最初にその値を発表しました。 $A_1^{(8)}$ の数値を 3 桁目まで確定するには、各時代の最先端のスーパーコンピュータを使用して 20 年以上かかり、本研究グループの木下教授と仁尾研究員によって 2005 年によりやく最終的な値が得られました。この計算は、理研 RSCC スーパーコンピュータの CPU の 2,048 台すべてを使用したとしても、少なく見積もっても丸 2 年の時間が必要になるというものです。この 2005 年の結果と、2006 年のハーバード大学の電子 g 因子の実験結果とをあわせて、世界最高精度での微細構造定数 α を実験と理論の共同で 2006 年に決定しました。この論文は、ハーバード大学の g 因子測定の結果論文とともに、AIP の 2006 年 The Top Physics Story に選定されています。

$A_1^{(2)}$ から $A_1^{(6)}$ までは、複数のグループによる全く異なる方法での計算が一致していることから、まず間違いなく正しいと考えられます。それに対して $A_1^{(8)}$ の値は、2005 年の値がただ 1 つあるだけの状況となっていました。そのため、独立な計算による検証が永く待望されていました。しかし、その計算規模の大きさ困難さから、誰もが手をつけることを躊躇していました。

2. 研究手法

光子を交換する数、つまり α が何個寄与するかに応じて計算の精度をあげていく方法を摂動計算と呼び、QED ではファインマン図に基づく方法で行います。さらに、朝永らが考案したくりこみ理論^{*13}を適用して、はじめて、電子の g 因子に寄与する量を求めることができます。これは素粒子物理の理論計算としては標準的な方法です。

g 因子に対して光子が 1 個ごとに及ぼす影響は、微細構造定数 α に比例した寄与となり、(1) 式の形で表されます。QED による計算で、これまで α の係数 $A_1^{(2)}$ から $A_1^{(8)}$ までの 4 項が具体的な数字として求められていました。

ハーバード大学では近いうちに、異常磁気能率の測定精度をもう 1 桁改良する計画です。その精度に対する理論計算では光子 5 個の影響に相当する α^5 (α の 5 乗) の寄与が必要となり、12,672 個のファインマン図を計算しなくてはなりません。この計算に必要とされる計算プログラムは、すべてあわせると 1 億行程度の長さにもなると見込まれています。研究グループは、この計算を実行するために、QED による g 因子の計算の自動化に着手しました。木下教授が考案した数値計算の方法論に、さらに、赤外発散^{*14}の処理方法に関する改良を加えることで、計算のすべての過程を自動的にコンピュータ上で行えるようにしました。

この自動化システム自身を検証する目的を兼ねて、 α^4 (α の 4 乗) の項の寄与 $A_1^{(8)}$

の値を再計算しました。特に 4 個の光子のみによる寄与を示す 518 個のファインマン図に目標を定めました (図 3)。これらは $A_1^{(8)}$ のなかでも、くりこみ理論による処理方法が最も複雑なものです。それが原因となって、今までプログラム自身の解析的な構造は検査されてきましたが、数値計算そのものを別の方法で実行し、値を評価することはなされていませんでした。研究グループでは、新旧の 2 つの計算結果をファインマン図ごとにつきあわせることで、自動化システムの検証と、以前の計算の検証とを同時に行いました。具体的には、自動化システムで生成した数値計算プログラムを、RSCC の PC クラスタで実行しました。1 日あたり 400 台から 700 台程度の CPU を数ヶ月間にわたって使用し、新しい計算結果を得ました。以前の $A_1^{(8)}$ の結果に比べると、新しい結果はまだ 1 桁精度が低い数値ですが、計算の検証を行うには十分な精度に達しています。

検証の結果、図 3 に示す M18 と呼ぶ 14 個のファインマン図に相当する計算において、数値計算の誤差の範囲を超えた食い違いが見出されました。さらに、詳細な探索の結果、以前に実施した M18 の 2,000 行を超える数値計算プログラム中に、わずか 4 行、他のプログラム中と同じ形でなければならない項が、違った形を持っている誤りを発見しました。同様の誤りは、同じ構造を持つ M16 の 2 行にも見いだされました。

M16 と M18 のプログラム中のごくわずかな訂正は、 $A_1^{(8)}$ を求める全プログラム 20 万行のなかの 6 行の訂正ですが、数値計算の結果としては、 α^4 の項 $A_1^{(8)}$ の値の約 10% に及ぶ大きな変更を伴う値になりました。

3. 研究成果

これまで間接的な検証しかできていなかった α^4 の項 $A_1^{(8)}$ の寄与を直接に計算することで、独立な計算結果を得ました。この計算結果をもとに前の計算の誤りを見つけ、訂正したところ、新旧の値は数値計算の誤差の範囲内で一致しました。研究グループが今回行った計算は、赤外発散の処理に新しい方法を採用しており、今までのものとは異なった新規の計算方法です。その両者が一致したということは、 α^4 の項 $A_1^{(8)}$ の値の信頼性が格段に増し、 $A_1^{(8)}$ を -1.9144 ± 0.0035 に確定したことになります。同時に、自動計算システムの信頼性も確立したことになります、次の α^5 の項の計算に適用するための確固とした裏づけが得られたことになりました。

今回得られた理論式をハーバード大学の実験値と等しいとすることで、 α の値を新たに

$$\alpha = 1 / (137.035\ 999\ 070 \pm 0.000\ 000\ 098)$$

と決定し、最後の 3 桁の数字を変更しました。理論と実験の双方が高い精度に到達していることの帰結として、この α は約 10 億分の 1 という高い精度を持ちます。つまり 9 桁目まで数字が確定しています。電子の異常磁気能率を使って決めた α の精度は、他の方法で決めた α よりも 1 桁上まわっています (図 4)。

微細構造定数 α も含め、物理や化学に表れる自然界の基本定数の値は、国際科学会議によって設立された CODATA の基礎物理定数部門^{*15}によって、さまざまな実験や理論計算の結果を判断し、その推奨値が決められます。今回の研究成果で電子の g 因子の理論式を変更したことにより、次期の CODATA 推奨値での α の値も変更され、それが世界中で使用されることとなります。また、 α を使って決められた、他

の物理定数や、測定の基準についても、変更を及ぼすことになります。

4. 今後の期待

本研究で自動化システムの検証が完了したことから、理論計算において迅速に α^5 (α の5乗)の項が得られるものと考えられます。ハーバード大学では、近くさらに実験の精度を上げる予定であり、理論値と実験値がともに更新されると、 α の値をさらにもう1桁知ることができると期待されます。自然界に存在する4種類の基本的な力^{*16}のなかで最も日常的な力、私たちが知るこの世界の有り様を形作っている電磁気力の強さを、より正確に知ることができるのです。

また、物理の理論発展への影響も見逃せないものがあります。素粒子物理の究極の目標は、物質の根源とは何かを探ることです。これまで、くりこみ理論を適用したQEDが、 g 因子をはじめ多くの物理現象を数値まで見事に予言してみせた事実は、素粒子物理の理論の発展を支える基盤となってきました。電磁気力だけでなく、強い力、弱い力もQEDを拡張した理論で説明できることがわかり、重力を除く3つの力を統合する理論として、現在の素粒子標準理論が構築され、さまざまな素粒子現象を説明してきました。QEDの検証とは、現在の素粒子理論の源流を検証することに他ならないのです。

しかし、QEDは創生の頃より、朝永をはじめ多くの人々が、最終的に正しい物理理論ではないだろうと予想していました。その理由は、QEDにおけるくりこみ理論の数学的に厳密な定義が当時も今もできないためです。それから60年、予想に反し、QEDは常に正しく自然を記述してきました。しかし、 α^5 (α の5乗)の項、1兆分の1の精度を超える段階で、ついにQEDの限界が見えることになるかもしれません。超巨大加速器による高いエネルギーの実験ばかりでなく、たった1個の電子の非常に低いエネルギーでの現象を詳しく調べることで、新しい世界観が切り拓かれることもありえるのです。

(問い合わせ先)

独立行政法人理化学研究所

仁科加速器研究センター 川合理論物理学研究室

協力研究員 仁尾 真紀子 (にお まきこ)

Tel : 048-462-4395 / Fax : 048-462-4698

独立行政法人理化学研究所

仁科加速器研究センター 川合理論物理学研究室

客員研究員

国立大学法人名古屋大学

大学院理学研究科

准教授 早川 雅司 (はやかわ まさし)

Tel : 052-789-2499 / Fax : 052-789-2932

独立行政法人理化学研究所

仁科加速器研究センター 川合理論物理学研究室
客員研究員
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (KEK)
素粒子原子核研究所
研究員 青山 龍美 (あおやま たつみ)
Tel : 029-864-5406 / Fax : 029-864-5755

(報道担当)

独立行政法人理化学研究所 広報室 報道担当

Tel : 048-467-9272 / Fax : 048-462-4715

Mail : koho@riken.jp

<補足説明>

※1 g 因子

特定の粒子の担う磁石としての強さを示す因子。粒子の回転と、磁石としての強さには関連があり、その間の関係を決める数。米国理論物理学者の A. ランデが 1922 年にフランクフルトの物理学教室でスペクトル線の微細構造を決める因子として導入した。

※2 光子

電磁力を媒介する素粒子。

※3 微細構造定数 α

電子の電荷 e の平方 e^2 に比例した、単位の無い数。電磁気力の強さを示す目安となる。水素原子のスペクトル準位に微細な構造が見つかり、その構造のエネルギー差が α に比例していることが理論的に説明されたことから、 α を微細構造定数と呼ぶようになった。ドイツの理論物理学者 A. ゾンマーフェルトによって導入された。

※4 量子電気力学(QED)

特殊相対論および量子力学の双方を満足する、電磁気力を記述する理論。ディラック理論と異なり、QED では電子の生成・消滅する過程も扱うことができる。くりこみ理論の適用を受けてはじめて、QED は実際の物理量を正確に計算できるようになった。1948 年ごろ朝永、ファインマン、シュウィンガーをはじめとする数多くの理論物理学者の貢献により完成した。

※5 摂動計算

主体となる大きな寄与が近似としてよくわかっている場合に、影響の小さな部分の効果を後から取り入れ、系統的に近似を改良する計算方法の 1 つ。物理や工学で用いられる。例えば、天王星の摂動計算で求めた軌道が、観測からわずかにずれていたことが、海王星の発見 (1846 年) につながった。

※6 磁気能率

電子の磁石としての性質を磁気能率と呼ぶ。電子のスピンと呼ばれる回転に伴って生じる磁氣的な性質である。

※7 ボーア磁子

1 個の電子の持つ磁石の大きさを測る単位。デンマークの理論物理学者 N.ボーアによって定義された。

※8 特殊相対性理論

A.アインシュタインが 1905 年に提唱した理論。等速で動くどの観測者から見ても、1) 物理法 則は同じ形であること、2) 光の速度が一定であること、の 2 つを前提とし、そこから導かれる結論全体を指す。質量とエネルギーの等価性、高速で移動する物体の長さが短くなること、時間と空間が交じり合うことなどが示される。

※9 量子力学

1920 年代に W.ハイゼンベルグや E.シュレーディンガーらによって作られた、電子や光子の運動など、微視的な世界を記述する法則を与える理論。それ以前は、ニュートンの法則や相対論によって宇宙のすべてが記述できると思われていた。

※10 ディラックの理論

英国の理論物理学者 P.ディラックが提唱した電子の性質を記述する理論で、特殊相対性理論と量子力学との融合を図っている。ディラック方程式という形で表される。この方程式から電子の g 因子が 2 であることがわかる。電子の反粒子である陽電子の存在も予言された。

※11 異常磁気能率

電子の g 因子の 2 からのずれを、異常磁気能率と呼ぶ。 $a_e = (g-2) / 2$ と表されることが多い。電子の異常磁気能率への寄与の大部分は QED による電子と光子の微視的な相互作用の結果で説明される。素粒子の標準模型の範囲では、強い力や弱い力の効果も、ごくわずかではあるが寄与を与え、考慮する必要がある。

※12 ファインマン図

摂動計算に現れる粒子間の相互作用の過程を視覚的に表現したもの。米国の理論物理学者 R.P.ファインマンにより考案された。QED の摂動計算では、電子と光子の間の相互作用は、図 2 上に示した素過程を組み合わせることで図 2 下のように描くことができる。各過程からの寄与は、ファインマン則と呼ばれるルールに従ってファインマン図に対応する計算式を書き下すことにより計算できる。計算式は相互作用頂点と粒子の伝播関数から構成され、一般には無限大の発散を含む多重積分の形になるため、実際に計算を実行するのは大抵の場合難しい。

※13 くりこみ理論

朝永らが考案した、摂動計算で物理量を得るための方法。ファインマン図に従って計算すると、ある条件のもとに量子ゆらぎが無限大の大きさになり、答えが無限大に発散して、物理的な意味を持たなくなってしまう。量子ゆらぎのほとんどは、観測される物理量にすでに取り込まれていると考え、そこから観測されるべき有限の量子ゆらぎのみを取り出す手法。後には、摂動論の枠組みを超えたくりこみも考えられるようになった。

※14 赤外発散

電磁気力が無限遠方まで到達できることと関連し、個々のファインマン図の計算が無限大に発散してしまうことがある。これは仮想光子のエネルギーが非常に小さい、つまり、波長が非常に長い赤外側にあるときに起こるので、赤外発散と呼ぶ。

※15 国際科学会議、科学技術委員会(CODATA)、基礎物理定数部門

国際科学会議は、科学とその応用分野における国際的活動を推進することを目的として、1931年に設立された国際的な非政府組織。世界各国のアカデミーや、分野別の国際学術連合が加盟団体である。科学技術委員会(CODATA)は、国際科学会議によって設立された、科学技術に関するあらゆるデータの信頼性の管理を行っている機関。基礎物理定数部門は、CODATAのデータに関する仕事のうち、基礎物理定数に関するあらゆる論文を収集し、その信頼性や相互関連を判断し、定数の値を決め発表することを行っている。米国国立標準局のサイト

(<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>) から各定数のCODATAによる最新の推奨値を知ることができる。

※16 自然界の4種類の力

自然界には4種類の基本的な力が存在する。電磁気力、重力、強い力、弱い力である。日常的な現象のほとんどは電磁気力と重力によって生じている。強い力は陽子や中性子を作り出し、さらに原子核を作り出している力である。弱い力は素粒子がごく短い距離にあるときのみ働く。

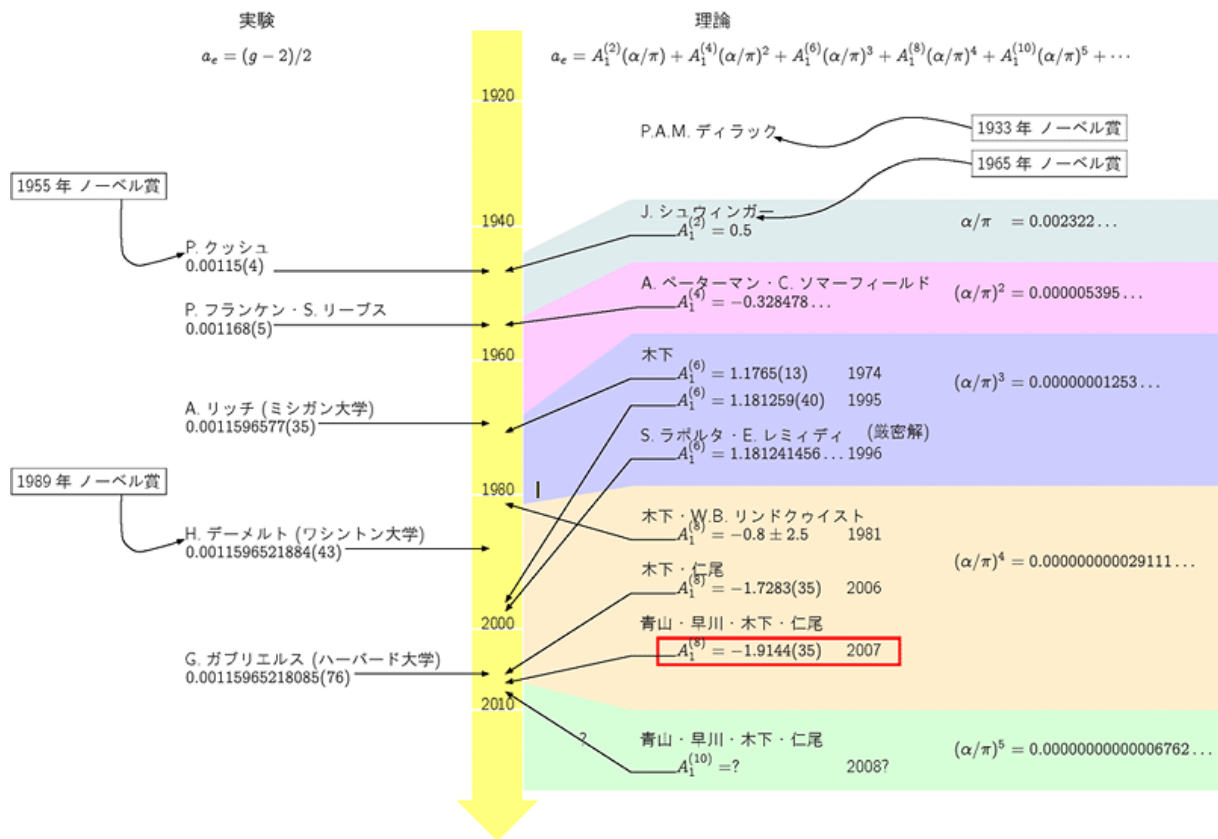


図1 電子の異常磁気能率 $a_e = (g-2)/2$ の測定と、その理論の発展の歴史

左側に電子 g 因子の測定精度の向上を示した。1970年代のリッチらの実験以降は、 g 因子そのものではなく、異常磁気能率 a_e を直接に測定している。右側は理論における異常磁気能率 a_e の精度の向上を、 α の各次数に応じて色分けをして表示してある。赤線で囲んだ結果が、今回の研究成果である。

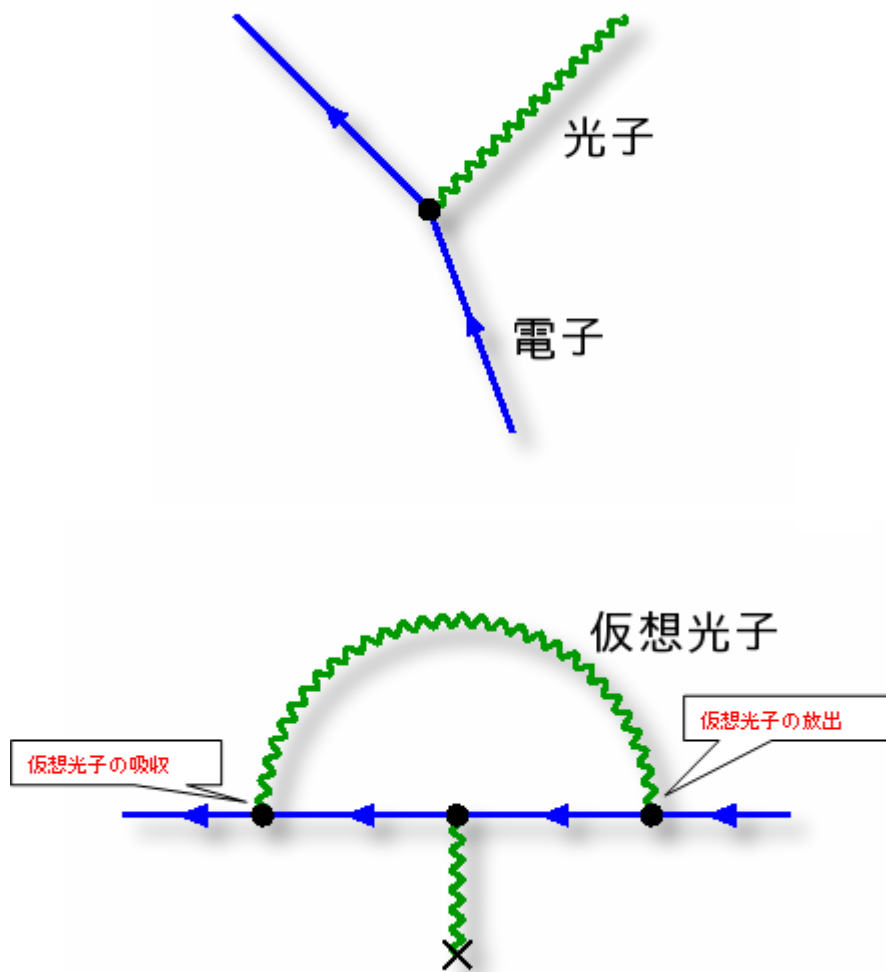


図2 量子電気力学でのファインマン図

上：電磁相互作用の素過程。緑の波線は光子を、青の直線は電子を表す。

下：量子ゆらぎの効果を生み出す仮想光子の放出・吸収過程。シュウィンガーが計算した α の項に寄与するファインマン図。QED では、1つの仮想光子を交換する効果は、微細構造定数 α に比例することが知られている。仮想光子の交換が、電磁気力の伝播を表しており、電子が光子を放出するときに電子の電荷 e が1つ、さらに電子が光子を吸収するときにもう1つの e がかかる。 α は e^2 に比例する無次元の数として定義され、 α は電磁気力そのものの強さを表す。

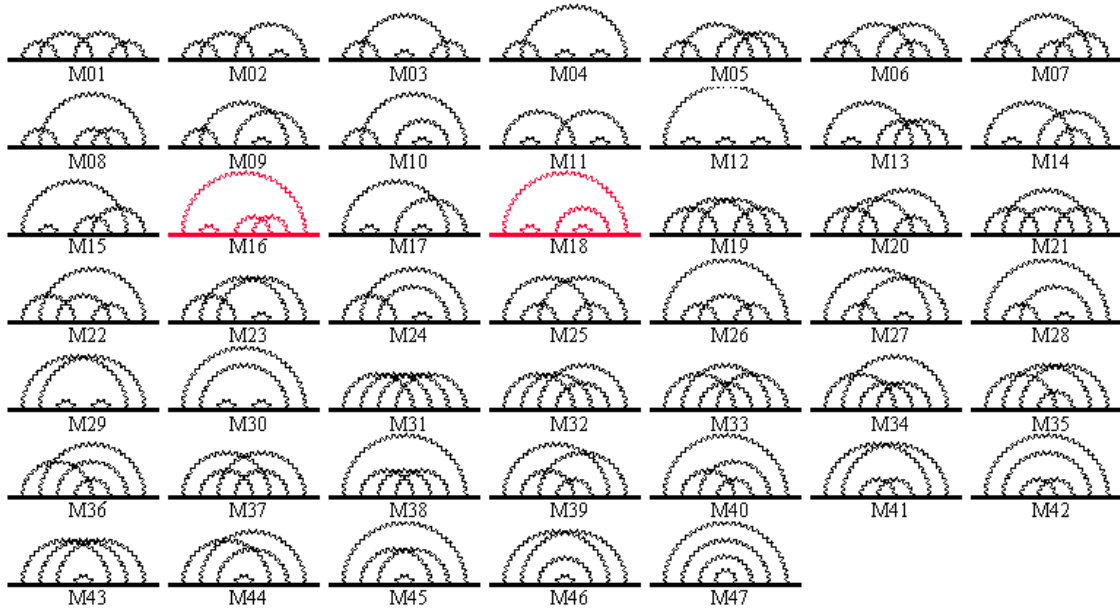


図3 電子の異常磁気能率 α の4乗の項のうち、
光子4個のみによる補正を示す518個のファインマン図

電子の g 因子が4個の光子からうける影響の仕方は518個のファインマン図で表される。構造の似た構造のものをまとめると、上の47種類の図で表される。直線が電子、波線が光子を表す。今回、赤で表したM16とM18からの寄与を修正した。M16とM18は、右隅にある2つの光子からなる部分図が交差しているか(M16)、虹になっているか(M18)の違いで、あとは同じ構造を持っている。

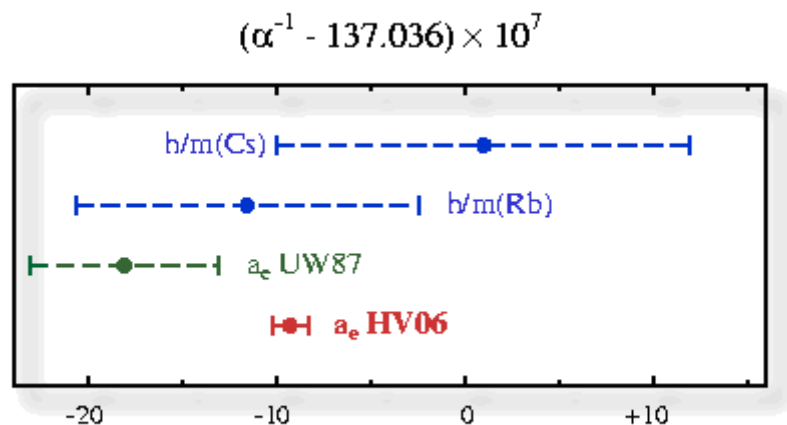


図4 さまざまな方法で決めた微細構造定数 α

電子の g 因子による方法、ルビジウム原子の実験による方法、セシウム原子の実験に

よる方法の3つが、現在、最も精度の高い α を決める方法である。「 h/m (Cs)」はセシウム原子による実験から2006年に決められた値、「 h/m (Rb)」はルビジウム原子による2006年の値。「 a_e UV87」はワシントン大学での電子 g 因子実験と今回の理論式から、「 a_e HV06」はハーバード大学での電子 g 因子実験と今回の理論式からそれぞれ決められたものである。点線は、それぞれの誤差の範囲を示す。 α は定数であるので、どのような物理現象から決めても、必ず同じ値になるはずである。現時点では、これらの α が一致していないとは統計的には断言できない。さらに α の精度を改良し、明らかな不一致が検出された場合、1) これまでの物理の理解を覆す新しい現象が起きている、2) それぞれの実験または理論に間違いがある、のどちらかである。