8 基礎物理

Fundamental Physics

北口雅暁	KITAGUCHI Masaaki	代表、名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所
小川泉	OGAWA Izumi	副代表、福井大学 学術研究院工学系部門
飯田崇史	IIDA Takashi	筑波大学 数理物質系
川崎真介	KAWASAKI Shinsuke	高エネルギー加速器研究機構
		素粒子原子核研究所
長濱弘季	NAGAHAMA Hiroki	東京大学 原子核研究所
佐藤朗	SATO Akira	大阪大学 理学研究科
野村大輔	NOMURA Daisuke	香川高等専門学校
堀正樹	HORI Masaki	Max Planck Institute of Quantum Optics
三部勉	MIBE Tsutomu	高エネルギー加速器研究機構
		素粒子原子核研究所
山中長閑	YAMANAKA Nodoka	理化学研究所
吉見彰洋	YOSHIMI Akihiro	岡山大学 異分野基礎科学研究所

8.1 基礎物理とは

現代物理学は、自然の基本的な相互作用とはどのようなものか、物質の最も基本的な構成要素は 何か、という問いに答えようと発展してきた。「素粒子標準理論(標準模型)」によって 20 世紀 の物理は一つの完成形をみた。

「素粒子標準理論」は現在のところ、量子色力学(QCD)とワインバーグ・サラム理論を組み合 わせて記述されている。それによると、標準理論はカラーSU(3)_C × 弱アイソスピンSU(2)_L × 弱ハ イパーチャージU(1)_Y ゲージ理論に従い、3 世代のフレーバー量子数を持ったフェルミオンと一種類 のスカラー場であるヒッグス場から成る。クォークはSU(3)_C ゲージ理論である QCD に従い、摂動 論的に扱える高エネルギーハドロン反応の実験結果のほとんどがその範疇で説明される。QCD には 未だに取り扱いの難しい非摂動的な物理があるが、近年の格子 QCD シミュレーションの発展のおか げでハドロンの質量の獲得の機構や原子核を構成する核力が第一原理的に QCD から導出できるよう になり、原子核物理やハドロン物理の基礎理論として QCD は完全に確立した。一方、電磁気力と弱 い相互作用の統一に成功したワインバーグ・サラム理論(SU(2)_L × U(1)_Y ゲージ理論)は、内包す るヒッグス機構によって W,Z ボソンやクォーク・レプトンの質量やそれらの間に働く相互作用を大 変良く説明する。ヒッグス粒子は2012 年、欧州原子核研究機構(CERN)のLHC 実験において発 見され、ついに標準理論に登場する粒子は全て揃った。さらに、弱い相互作用を介したクォークの混 合現象や CP 対称性の破れも小林・益川理論によって満足に説明されている。標準理論は現時点での 加速器実験の結果を矛盾無く説明する。現在LHC 実験は最高到達エネルギー 13TeV において標準 理論を高精度に検証しているが、標準理論との矛盾は見つかっていない。

このように成功を収めている標準理論にも、不十分な点は多く存在する。



図 8.1:素粒子標準理論に登場する粒子

まず、実験的観測によって知られている標準理論では説明が十分でない項目を挙げる。

重力:

標準理論には量子論的な重力の記述がない。重力は標準理論で記述される相互作用と比べて大 変弱いが我々にとって最も身近な力であり、それを記述する一般相対性理論はプランクスケール 程度のエネルギー(10¹⁹GeV)において標準理論と何らかの形で統一されると期待されている。

暗黒物質:

宇宙には暗黒物質が存在することが多くの観測や理論研究から有力視されているが、標準理論 にはその候補の粒子が存在しない。

• ダークエネルギー:

宇宙は加速膨張していることが観測からわかっており、真空のエネルギー(ダークエネルギー) の存在が示唆されているが、標準理論の場によるその説明は難しい。

• CP 対称性の破れ:

宇宙には反物質がほとんどなく、物質優勢である。それを実現するためには十分な CP 対称性の 破れが必要であるが、標準理論の CP 対称性の破れは大きく不足していることが分かっている。

● ニュートリノ質量:

ニュートリノの有限質量も大きな問題となっている。標準理論の対称性はニュートリノの質量 を禁止しないが、観測された質量は他の粒子に比べてあまりにも小さすぎるのである。「ゼロ でないが小さい」ことは、それを小さくする機構の存在を示唆している。最近では、ニュート リノの質量を発見するきっかけとなったニュートリノの混合だけでなく、その CP の破れも示 唆されており、レプトンセクターには物質優勢の宇宙の問題を解決するヒントもあるかもしれ ない。

• Strong CP 問題:

QCD には CP 対称性を破る相互作用項(シータ項)があり、制限される理由はない。しかし、 中性子の電気双極子モーメントが実験的に観測されていないことから、その項の結合定数が 10⁻¹⁰ よりもきつく制限されている。この不自然な小ささは Strong CP 問題と呼ばれ、それを 解決する機構として Peccei-Quinn(PQ) 機構および PQ 対称性の自発的破れから生じる南部= ゴールドストン粒子 axion の存在が期待されている。axion は暗黒物質を説明する有力な候補 の一つである。

また、理論的に問題視されている項目もある。

階層性問題:

標準理論に登場する質量パラメータはおよそ GeV~MeV の領域にあり、ヒッグス場のエネル ギースケールによってコントロールされている。しかし、存在が判明している他の物理、例え ば重力の結合定数(~10¹⁹GeV)や宇宙定数(~eV)などからは、標準理論とはエネルギース ケールが大きく異なる理論の存在が示唆されており、このスケールの差を説明することが標準 理論自身では難しい。

ゲージ理論の統一:

標準理論を構成しているゲージ理論は SU(3)_C × SU(2)_L × U(1)_Y ゲージ群であるが、標準理論 ではそれが与えられているだけで、その起源は分からない。クォークとレプトンのアノマリー の相殺やくりこみ群による結合定数の解析から標準理論のゲージ理論が非常に高いエネルギー スケールにおいて「大統一」することが期待されている。

ヒッグスセクターの起源:

ヒッグス場は標準理論における唯一のスカラー場であり、特異的な存在である。重要な問題と して、ヒッグスポテンシャルのエネルギースケールはなぜ 100 GeV 付近が選ばれたか(階層性 問題)、素粒子か複合粒子のどちらか、複数種類のヒッグス粒子が存在するか、どのような高 エネルギースケールの理論の有効理論としてヒッグスポテンシャルが現れたかなど、などがあ るが、標準理論においては一切説明できない。

フレーバーの起源:

クォークとレプトンは3世代存在し、クォークにおいてはその混合において良い精度でユニタ リティまで成り立っている。そのような性質は背後に何かしらの物理的な機構が存在すること を期待させる。また、クォーク・レプトンにおける質量の階層(湯川結合定数の階層性)の存 在、小林・益川行列の対角要素が大きいこと、ニュートリノの混合が非常に大きいこと、荷電 レプトンがほとんど混ざらないことなど、標準理論の範囲では理解できない多くの非自明な性 質がある。

上記の問題点は TeV スケールかそれ以上にある標準理論を越えた新しい理論によって説明される と期待されている。



高エネルギーフロンティアの実験が巨大化・長期化する中、精密測定による早期の成果が世界的に も期待されている。



図 8.2: 基礎物理の目標と、それに至る各種実験

この章では、日本のグループが主導している以下の5つのテーマ(図 8.2)について取り上げる。

1. 反陽子の精密分光による CPT 対称性検証実験:

物理法則の基本的な性質として、物質と反物質を交換する「荷電共役変換(C)」と、空間およ び時間座標の符号を反転する「パリティ変換(P)」と「時間反転(T)」を同時に行っても不変で あると信じられている。この CPT 対称性は、平坦な時空間におけるローレンツ不変性、確率 保存、局所場の量子論という極めて一般的な仮定のもとで保存されており、その帰結として粒 子と反粒子の質量、寿命、磁気能率の絶対値は等しくなる。反陽子を用いてこれらを高い精度 で比較し、CPT 定理を検証することができる。一方、仮に CPT 対称性を破るような場の理論 があった場合、それはローレンツ対称性も同時に破る事が知られている(グリンバーグ定理)。 CPT 対称性は、光速の不変性などと同様に、あまりにも基本的な性質であるため、特定の精 度で破れる等の理論的上限をあらかじめ想定する事は難しい。しかし、技術的進歩によって実 験の精度は着実に向上されており、未知の新たな領域を探索できる可能性がある。

 各種粒子の電気双極子能率(EDM)測定や原子核反応における時間反転対称性検証と標準理 論を超える物理の探索

宇宙の物質数と光子数の比は約1:10¹⁰ であることが観測から分かっているが、標準理論の CP 対称性の破れの大きさではこの物質数を再現できない。基本的粒子の電気双極子モーメン ト(EDM)の存在は即座に時間反転対称性を破り、その探索・測定は CP の破れの機構解明に 重要な役割を持っている。標準理論で有限の EDM が存在するには高次ループを経なければな らないため、その値は現状の技術では測定できないほど小さい。一方 SUSY や multi-Higgs な どを仮定すると大きな EDM を自然な形で導出できる。現在、EDM は中性子、原子核、電子、 ミューオン、原子など、様々な系において調べられており、すでに様々な素粒子模型に厳しい 制限を与えている。

3. ミューオン異常磁気能率・ミューオニウム超微細構造分裂の精密測定による標準理論の検証と 標準理論を超える物理の探索、およびレプトンフレーバー数非保存過程の探索

ミューオンの異常磁気能率 (g-2)、EDM、および荷電レプトンフレーバー数非保存過程は、標準理論から極めて高精度で予測することができる。例えばミューオンのg因子はディラック方程式からは厳密に2であるが、量子補正効果によってわずかに2からずれる。そのずれg-2を高次の補正を含む計算により ppm オーダーで計算・比較できるようになった。ブルックヘブン国立研究所で行われた実験でg-2が標準理論の予想から 3.4σ 大きいと報告されており、その検証が急務である。EDM の存在はレプトンセクターでの CP の破れを直接意味し、次項で説明する 0ν DBD 探索でのレプトン数非保存とあわせて、宇宙の物質・反物質の非対称を解明する手掛かりになる。荷電レプトンフレーバー数非保存過程は標準理論では禁止されているため、クリーンな探索が可能となる。

 4. ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊(0*ν*DBD)探索によるマヨラナ性検証とニュート リノ質量測定実験

ニュートリノは質量があるにもかかわらず右巻きが存在しないことから、粒子と反粒子が同一 であるマヨラナ粒子である可能性が出てきた。ニュートリノがマヨラナ粒子であるとすると右 巻きに大きな質量、左巻きに小さな質量を与えることが許される(シーソー機構)。ニュート リノを放出しない二重ベータ崩壊(0*v*DBD)が観測されればニュートリノがマヨラナ粒子であ ることを意味し、また 0νDBD の寿命を測定することで、ニュートリノの質量(有効マヨラナ 質量)を求めることができる。さらにレプトンの CP の破れと組み合わせて物質優勢宇宙を説 明できる(レプトジェネシス)。(300 ページ参照)

5. 暗黒物質探索実験:

銀河の回転速度や重力レンズ効果など、近年の宇宙観測の進展により暗黒物質の存在自体はか なり確定的になった。暗黒物質探索実験は、その正体として予言されている未発見の粒子を探 索するものである。候補としては WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)、axion など があり、それぞれ原子核の反跳や光子との結合などを利用する。axion は Strong CP 問題を解 決する理論によって予言されているという点でも興味深い。

基礎物理・精密測定の実験は、理論の予言による目標精度があるとはいえ、どのエネルギースケー ルにどのような形で新物理が現れるかは原理的には分からない。実際に新しい発見があるまで測定感 度を向上し続ける必要がある。高エネルギー実験や宇宙観測とは互いに制限を与え合う関係にあり、 いずれかの実験で制限が更新されたとしてもさらにその先の精度を狙う意義は薄れない。広いエネル ギースケールを様々な手法で探索し、いざ発見の際にはそれに注力する、という戦略でなければなら ない。真に新しい発見に至るには複数の実験が必要であり、一つの実験で「新しい発見」がなされた 後も複数の実験が互いにその無矛盾性を検証する重要性は変わらない。今後高エネルギー物理や宇宙 物理分野の研究者とも連携して推進して行くことが重要である(図 8.3)。



図 8.3: 基礎物理における核物理の役割

8.2 反陽子の精密分光による CPT 対称性検証実験

8.2.1 分野の現状

低速反陽子分野の主要なテーマは、1.反水素原子のレーザーおよびマイクロ波分光、2.反水素原子 の重力加速度の測定、3.反陽子へリウム原子(反陽子と電子とヘリウム原子核から構成される特異原 子)のレーザー分光、4.ペニングトラップ中に捕獲された反陽子と陽子のサイクロトロン周波数の 比較、および磁気モーメントの測定である。これらは物質と反物質の性質を可能な限り高い精度で比 較することによって、CPT 定理を検証するという目的をもっている。過去5年間で、欧州合同原子 核研究機構 (CERN)の反陽子減速器 Antiproton Decelerator (AD) において、反水素原子や反陽子 ヘリウム原子の遷移エネルギーおよび、反陽子の質量や磁気モーメントが、9桁から11桁程度の精 度で相次いで決定されている。分野の研究者数は欧米を中心に数倍に増えている。

CPT 対称性やローレンツ対称性を自発的に破る場の理論のフレームワークとしては、Standard Model Extension (SME) が存在するが [1]、CPT 対称性があまりにも基本的な性質であるため、特 定の精度で破れる等の理論的上限をあらかじめ想定する事は難しい。様々な実験によって SME 中で 定式化された、ローレンツ対称性を破るようなパラメータの上限値が求められている。また、QED の三体問題についての新たな知見、(反) 陽子と電子の質量比など国際単位系の基本となる自然定数 の導出、原子核と反陽子の散乱断面積などの原子核物理の興味、反物質で構成された非中性プラズマ の研究など、様々な分野に通ずるテーマを持っている。また、実験で測定された反陽子へリウム原子 の遷移周波数と、量子電磁力学の理論計算の結果を比較することによって、第五の力の上限値 [2, 3] や、アクシオンなどの未知のスピン0場との相互作用の上限値 [4, 5] が求められている。

8.2.2 最近の進展

反陽子の実験は、CERN の反陽子減速器で行われている。AD は運動エネルギーが5 MeV の反陽 子を毎分3×10⁷ 個供給しているが、現在5つの実験がこのビームを8時間交代で毎年数ヶ月間使っ ている。平均して毎分数万個の反陽子をペニングトラップで捕獲して、数百個の反水素原子を合成し ている。

ASACUSA 実験は、反陽子へリウムのサブドップラー二光子レーザー分光測定 [6] やガスバッファー 冷却法 [7] によって、反陽子と電子の質量比を 1836.1526734(15) と決定した。陽子と電子の質量比は、 高い精度で測定できる無次元の基本的物理定数の一つであり、国際単位系の基本パラメータであるた め、様々な高精度実験の結果に影響する。今後、さらにレーザー装置や実験手法の高度化によって、 10⁻¹¹ 程度以下まで実験精度を改善できる可能性がある。また、負パイ中間子とへリウム原子核と電 子で構成された準安定なパイ中間子へリウム原子のレーザー分光実験を PSI のリングサイクロトロ ン施設で行っているが、最近、赤外線遷移の測定に成功した [8]。今後、実験を高度化して、負パイ 中間子の質量を高い精度で決定する予定である。パイ中間子は反陽子に比べて質量が小さいため、パ イ中間子へリウム原子はオージェー遷移に対して不安定である。また、パイ中間子とへリウム原子核 は、ともにスピン0粒子であるため、量子電磁力学の高次補正が通常の原子と大きく異なり興味深 い。この実験は、こうした三体系について新たな知見を与えることも期待される。

反水素原子については、 ALPHA 実験が反水素原子を合成してトラップの中に捕獲して、1s 状態 の超微細構造のマイクロ波分光 [9] および、1s2s 二光子遷移の高精度分光 [10]、ライマン α レーザー による 2p 状態の微細構造の解明 [11] などに成功した。また、反水素のレーザー冷却実験に取り組ん でおり、さらに高い精度の分光実験が期待される。ASACUSA 実験は、カスプトラップを用いて、同 じ 1s 状態の超微細構造の分光実験を計画している [12]。BASE および ATRAP 実験は、反陽子を磁 気トラップに捕獲して、電荷/質量比や磁気モーメントを 10⁻⁹~10⁻¹¹ の精度で求めている [13, 14]。 とくに BASE 実験は近日中に、この精度をさらに高める予定である。ALPHA-g、AEGIS、および GBAR 実験は、反水素原子を重力落下させて、反物質の重力加速度を測定することを目指している が、これは反物質における等価原理を検証する開拓的研究になる。

8.2.3 今後の展望

AD 施設に新型減速リング ELENA を増設して、運動エネルギー 100 keV の大強度反陽子ビームを 生成する計画が進行中である [15]。2018 年に電子冷却された反陽子ビームを取り出すことに成功し た。これは直径 10 メートルの小型リングで、電子ビーム冷却装置を搭載している(図 8.4)。この施 設から供給される冷却された反陽子ビームを用いれば、単位時間あたり現在の 100 倍の反水素原子が 生成できることが期待される。これは、主に CPT 対称性をさらに高い精度で検証する実験や、反水 素の重力実験に使われる予定である。日本人を含むグループは、とくに引き出しビームラインとビー ム検出器群の建設を担当した。



図 8.4: 減速リング ELENA。直径 10 メートル。

反陽子ヘリウム実験は、ELENA 施設における専用のビームラインで 2021 年より推進される予定 である。従来は、いくつかの実験と同一のビームラインを共用していたため、装置を毎年撤去する必 要があり、高精度実験を難しくする作業環境であったが、今後は、これが大幅に改善される。最近の 半導体型励起光源や固体結晶を使った大強度高精度レーザーや、反陽子を高効率で減速するインダク ション減速装置を開発中である。反陽子ヘリウム原子の理論計算については、現在 ma⁸の高次 QED 補正項が計算されている。これは水素のような二体原子においても、近年計算が可能になった寄与で あり、三体についても正確な数値が得られるようになれば、少数系の分野にとっては画期的であると 言える。反陽子ヘリウム原子の研究により発展した三体 QED 計算は、最近 HD⁺ イオンの遷移エネ ルギーの計算にも応用され、自然定数の決定に貢献している [16, 17]。

CERN における低速反陽子分野は日本の核物理コミュニティから離れており、主に原子物理や素 粒子物理分野の研究者を中心に研究が推進されている。欧州では、反陽子を用いた原子核物理で残さ れた最大のテーマを、チャームを含むエギゾチック状態のスペクトロスコピーであると考えている。 これは FAIR の PANDA 実験で追求される予定である。

8.3 各種粒子の電気双極子能率(EDM)測定や原子核反応における時間反転対称性検証・ 標準理論を超える物理の探索

8.3.1 分野の現状

我々の存在する宇宙における物質数と光子数の比は約1:10¹⁰ であることが観測から分かってい る。光子が物質と反物質の対消滅で生じたと考えると、その比は宇宙初期において物質数と反物質数 の間に1:10⁻¹⁰ 程度の非対称性があったことを物語る。その非対称性を実現するためには基本理論 の CP 対称性の破れが必要であるが、標準理論が予言する CP 対称性の破れではその非対称性は実現 が不可能であることが分かっている。そのため、CP 対称性の破れの起源・機構の解明は、現代物理 学の本質的な理解において重要なテーマである。

CPT 定理を仮定すれば CP の破れと T の破れは等価である。基本粒子の電気双極子モーメント (EDM)の存在は、時間反転対称性を破る(図 8.5)ため、CP の破れの機構解明に重要な役割を 持っているが、様々な実験にもかかわらず未だに有限な測定されていない。(これ以降、素粒子・核 子・原子核といった粒子の永久電気双極子モーメントのことを単に EDM と書く。)また EDM の探 索・測定は現在の素粒子標準理論を越える物理の探索における強力なプローブとなる。前述の通り基 本粒子の EDM は標準理論では現状の技術では測定できないほど小さく計算される。一方 SUSY や multi-Higgs などを仮定すると大きな EDM を自然な形で導出できる。有限の値の EDM が観測され れば、それは標準理論を超える物理が存在することの証明であり、その機構解明に大きな役割を果 たす。

現在、EDM は中性子、原子核、電子、ミューオン、原子など、様々な系において調べられており、 それぞれは複雑に基本スケールにおける P および CP 対称性の破れに関係している [18]。中性子や 原子核の EDM はクォークの EDM やクォーク多体間の P,CP 対称性を破る相互作用をはじめとした 多くのクォークに関連する(ハドロンセクターの)P, CP 対称性の破れの機構に感度がある。電子や ミューオンの EDM の直接測定からはレプトンにおける CP 対称性の破れの情報を得ることが可能で ある。また、ハドロンとレプトンの複合系である原子の EDM の測定も重要である。原子は常磁性原 子と反磁性原子に分類することができ、常磁性原子 (Tl, Fr など) は電子の EDM に特に感度がある。 反磁性原子 (Hg, Xe, Ra など) はハドロンセクターの CP 対称性の破れに対する感度が高い。また、



図 8.5: 時間反転と EDM。EDM は電荷分布に寄るため時間反転に対し値を変えない。一方、基本粒 子の持つスピンは時間反転対称性に対し向きを反転させる。



図 8.6: 各種粒子の EDM やβ崩壊とその起源 [19]。矢印はそれぞれ個別の理論計算を要することを 表している。

両者ともに P および CP を破る電子-クォーク相互作用に感度があり、これは原子の EDM の特徴で ある。以上のようにそれぞれの系の EDM は基本スケールの P、CP 対称性の破れに対して固有の関 係性を持っている(図 8.6)。標準理論を超えた物理の候補は基本スケールにおいてそれぞれ異なった P、CP 対称性の破れを与えるため、上述の系どれか一つの EDM を測定すればよいというものでは なく、多くの系の EDM を測定することが基本スケールの CP 対称性の破れの解明において極めて重 要である。日本国内はこれら全ての研究グループが存在する非常に充実した状況にある。

理論計算によってこれら中性子や原子・分子といった複合粒子で素粒子レベルの CP の破れを議論 するためには、素粒子物理とその系が観測できるスケールの物理を繋ぐ多体計算が必須である。過 去、この多体計算における大きな理論的不定性は多くの標準理論を超えた新しい物理の現象論的な解 析の障壁となっていたが、ごく最近、新たな手法が開発され、計算機性能の向上とも相まって複合粒 子の EDM の理論計算の精度は大きく改善された。また、ハドロン、原子核、原子のスケールにおけ る CP を破るプロセスの物理現象としての理解が進み、微視的な CP の破れの増幅・抑制の予言も可 能となってきている。

一方、**原子核反応の対称性からもCP対称性の破れを調べることができる。**歴史的にもパリティ対称性の破れは Lee と Yang によって予言され、Wu らのベータ崩壊の実験によって証明されたもので あった。この頃からベータ崩壊はパリティ対称性だけでなく、時間反転対称性も破り得るものとして 注目されていた。

ベータ崩壊の崩壊率を、ローレンツ不変性だけを仮定して、代表的な相関項を書き下すと次式のようになる [20]

$$\omega \propto 1 + A \frac{\vec{p_e}}{E_e} \cdot \frac{\langle \vec{J} \rangle}{J} + D \frac{\langle \vec{J} \rangle}{J} \cdot \left(\frac{\vec{p_e}}{E_e} \times \frac{\vec{p_\nu}}{E_\nu} \right) + R \vec{\sigma_e} \cdot \left(\frac{\langle \vec{J} \rangle}{J} \times \frac{\vec{p_e}}{E_e} \right) + \cdots$$

ここで *p* は運動量、*E* はエネルギー、*J* はスピンを表し、添え字の *e*、*v* は電子及びニュートリノを 表す。*A* の項が電子の運動量と親核のスピンとの相関項で、すなわち Wu らによって測定されたパリ ティ対称性を破る項である。*D* と *R* の項は、いずれも時間反転対称性を破るが、*D* はパリティを保 存し、*R* はパリティ対称性も破るという違いがある。

時間反転対称性を破る相関であるという共通点から、D 相関や R 相関は EDM と比較されること がある。例えば、EDM の上限値を使って、それらの相関に対して制限を与えることができる [21]。 しかし、現状では両者を直接結びつけることは困難で、ベータ崩壊における時間反転対称性を破る相 関項と EDM とは競争的であるというよりは相補的であると言える [22]。

8.3.2 最近の進展

中性子EDM

中性子の EDM は、スイス・PSI の加速器中性子を用いた実験による 1.8×10⁻²⁶ e·cm が現在の上限である [23]。SUSY など標準理論を超える物理は 10⁻²⁷ ~ 10⁻²⁸ e·cm を予言しており、あと一桁から二桁の感度向上に期待が高まっている。この測定には運動エネルギーの極端に小さい超冷中性子(UCN)が用いられた。UCN は物質の実効ポテンシャルによって容器内に閉じ込め、蓄積することができる。そこに電場と磁場を印加することで UCN はスピン歳差回転を行う。有限の EDM が存在する場合、電場の向きによってスピン歳差回転周期が変化するため、これを精密に測定することで EDM の値を求めることができる。磁場に不均一があるとスピン歳差回転が変化し、見かけの EDM が現れてしまう。現在の測定感度は統計精度で制限されているため、現状の 10 UCN/cc から 1000 UCN/cc を一つの目標とした密度向上のために、新しい UCN 源の開発が世界的に進められている。

前述のスイス・PSI の実験では、大強度サイクロトロンからの陽子ビームを専用ターゲットに入射 し核破砕によって中性子を発生させ、固体重水素中での非弾性散乱によって UCN に変換する [24]。 一方、阪大 RCNP と KEK のグループは超流動ヘリウム中での非弾性散乱を用いた UCN 生成を行っ ている [25]。超流動ヘリウム内では UCN 寿命が長いので連続して中性子を供給し続け UCN 密度を 上げることができる。カナダ・TRIUMF に専用陽子ビームラインを建設し、UCN を生成すること に成功した [26]。現在、1000 UCN/cc を超える UCN 密度を得るための UCN 源のアップグレードを 行っている。

理想的には、超流動ヘリウム内でスピン歳差回転・測定まで行うのが効率が良い。アメリカ・SNS では超流動ヘリウムで満たされた EDM 測定容器を計画している。ここでは偏極ヘリウム3も同時 に UCN 容器内に入れ、中性子のスピン偏極と偏極解析も容器内で行うことで中性子のロスを抑制す る [27]。

系統誤差の大きな要因である磁場の一様性・測定精度に関する実験的要求は、中性子・原子 EDM 実験とで共通しており、共同して高精度の磁束計の開発が進められている。

原子EDM



図 8.7: 左:¹²⁹Xe 原子 EDM 探索を目指した能動帰還型核スピンメーザー装置。 右:観測されている核スピンメーザー発振信号

トラップされた原子は長時間電磁場と相互作用させることができ、EDM 測定に適している。この 場合原子の種類によって、主に原子核の EDM を増幅する反磁性原子を用いた実験と、電子の EDM に感度の高い常磁性原子を用いた実験がある。両者ともに P および CP を破る電子 – クォーク相互作 用に感度がある。

反磁性原子を用いた原子 EDM 実験は、¹²⁹Xe と ¹⁹⁹Hg の 2 種類に絞られて遂行されている。こ れらは核スピンが 1/2 であり、かつ軌道電子系が角運動量を持たないので、比較的高い原子密度 ($10^{14} \sim 10^{18}$ /cm³) において数百秒以上の核スピンコヒーレンス時間を達成できるのが特徴である。 そのため EDM 測定に必要なスピン歳差周波数の高感度測定を行うことが可能になる。Princeton 大・ Washington 大のグループは ¹⁹⁹Hg の原子 EDM 探索実験を行ってきて、全ての EDM 実験の中で最 も厳しい上限値 7.4×10⁻³⁰ e·cm を報告している [29]。実験手法としては原子のガスをセルに封入し レーザーポンピングによりスピン偏極させ、電磁場中でのスピン歳差位相をプローブレーザー等に よって解析する。

Michigan 大学のグループは核スピンメーザーによる¹²⁹Xe EDM 測定実験を行い、上限値 4.0×10⁻²⁷e.cm を報告している [30]。 その後、ドイツを中心とした国際共同グループは高性能磁気シールドルーム及 び SQUID 磁気センサーを利用して¹²⁹Xe と³He の核スピン歳差を同時検出する実験系を構築し、 1.4×10^{-27} e.cm まで上限値を向上した [31]。一方国内では磁場変動による系統誤差の抑制を目指 し、理研のグループが¹²⁹Xe 低周波核スピンメーザーの開発を行ってきた [32]。現 在 一 回 の 測 定あたり、10nHz を切るスピン歳差周波数決定精度を実現していて、これは¹²⁹Xe 原子 EDM に対する感度としては 10⁻²⁸ e.cm レベルに差しかかっている (印加電場強度 *E*=10kV/cm を 仮定)(図 8.7)。また長期的な周波数ドリフトを抑制するために異なるアイソトープ¹³¹Xe を共存 させて、¹²⁹Xe と ¹³¹Xe を同時に核スピンメーザー発振させることに成功しており、精度改善が進 行中である [33]。未だどの系においても有限の値の EDM は測定にかかってはいないが、¹⁹⁹Hg の 7×10^{-30} e.cm という極めて小さい上限値から、CP 対称性を破る様々なパラメータに対して厳しい 制限値が付けられている。例として、CP 対称性を破るπ中間子と核子の結合定数(アイソベクトル 成分に関しては $\overline{g}^{(1)} < 2.3 \times 10^{-12}$)のみならず、QCD- θ 項について $\overline{\theta}_{\rm QCD} < 1.5 \times 10^{-10}$ 等が挙げ られる [30]。その他、単純な SUSY 模型における CP 非保存位相にも既に厳しい制限を付けていると も指摘されている。

常磁性原子による電子 EDM 実験は、セル中に閉じ込めた Cs 等の安定原子 [34] や、Tl 等の原子

線 [35] を用いて進められてきた。しかし、従来の手法では、測定領域の電場・磁場の非一様性から、 EDM の探索精度が 10⁻²⁸ e·cm の限界を超えることは困難だった。標準理論を超える様々な理論の枠 組みが予想する 10⁻²⁹ e·cm から、標準理論が予想する ~ 10⁻⁴⁰ e·cm までの未探索領域に、CP 非保 存の起源に関わる多くの情報があると予想されており、この測定感度を超えるために、測定精度を決 める各要素であるスピン偏極保持時間、電子 EDM の増幅度、印加電場強度等をさらに大きくするた めの工夫が検討されている。ここ最近では、極性分子内で大きく増幅された内部電場を利用すること で EDM 測定感度を格段に高める実験が進んでおり、様々な極性分子生成による電子 EDM 探索が検 討されている。2011 年には、英国のグループによる YbF 分子を用いた測定結果が報告され [36]、さ らに 2014 年には、米国のグループによる ThO 分子の測定でこれまでの電子 EDM の上限値が更新さ れ(|d_e| < 8.7×10⁻²⁹ e·cm) [37]、注目を集めている。極性分子を用いた電子 EDM 探索が進められ る一方で、電場・磁場の非一様性から生じる系統誤差を抑え、長いスピン-電場相互作用時間・スピン 偏極保持時間を実現するため、レーザーを用いた冷却・トラップ技術を駆使した局在捕捉原子による EDM 探索が検討されている。レーザー冷却・トラップ技術の適用しやすさと高い電子 EDM 感度を両 立していることから、Cs 原子を用いた測定が米国など複数のグループで進められている [38, 39, 40]。 国内では、Fr を用いた EDM 探索実験のプロジェクトが、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソ トープセンターや東京大学原子核科学研究センターを中心に進められている。

EDMの理論計算

原子の EDM による素粒子レベルの物理の解析を行うためには、原子核や原子レベルの多体計算が 必要になる。ハドロンレベルの CP 対称性を破る相互作用(核子の EDM、CP を破る核力)が存在す る場合、原子核は EDM を持つ。原子や分子における原子核の EDM は電子の再配置により遮蔽され、 原子核の体積効果である Schiff moment が CP を破る過程として効く [41]。原子核の Schiff moment はコアと一つの価核子を仮定した簡単な殻模型で計算することが可能であるが、近年の研究ではそ の見積もりは正しくないことが示唆されており、その模型で考慮されていないコアの分極の効果が原 子核の Schiff moment を強く抑制することが、最近の Dmitriev らや吉永らの研究によって明らかに なっている [42, 43]。原子核の Schiff moment が大きく増幅される現象としては 8 重極変形がある。 8 重極変形は逆パリティの状態のエネルギー準位を近づけるため、逆パリティの状態間の遷移によっ て生じる Schiff moment を始めとした CP を破るモーメントは増幅される。8 重極変形が見られる原 子核としては、²²⁵Ra や ²²³Rn などがあり、²²⁵Ra に関しては ¹⁹⁹Hg に比べて Schiff moment が 100 倍単位で増幅されることが理論計算によって示されている [44]。

原子の EDM に寄与する源を大きく分類すると (1) 電子の EDM、 (2)CP を破る電子--核子相互作 用、そして (3) 原子核の Schiff moment がある [18]。これらのうち (1), (2) の電子の EDM と CP を 破る電子--核子相互作用が常磁性原子に対して、また (3) の原子核の Schiff moment が反磁性原子に 対して効くことが知られている。またいずれの寄与も強い内部電場によって増幅されるため、感度 の高い系は大きな原子に限られる。簡単な議論により、電子の EDM は常磁性原子において原子番号 (Z) のおおよそ 3 乗で増幅されることがわかっている。特に、アルカリ金属ではその増幅率が顕著で あり、フランシウム原子では 1000 倍近い増幅率が理論的に予言されている [45, 46]。反磁性原子は 最外殻の電子のスピンが閉じているため、電子の EDM の寄与は強く抑制されているが、原子核の Schiff moment に対する感度があり、その効果はおおよそ Z の 2 乗で増幅される。原子の EDM の 理論的評価は平均場近似に基づいた手法と相対論的結合クラスタ法を中心に研究されており、両者の 予言は概ね一致している。主要な CP の破れに関する原子レベルの理論計算の誤差は 10% 以下であ り、高い信頼度を誇っている [19]。

原子核反応

ベータ崩壊の D 相関を求めるためには、親核のスピンと、電子とニュートリノの運動量が必要に なる。ニュートリノ運動量を求めるためには、電子運動量と反跳核運動量を求めて補完することにな る。従って、如何に反跳核の運動量を正確に測定するかが鍵となる。以前は、偏極した不安定原子 ビームを生成し、低速で飛行中に崩壊する様子を捉えていた。最近では、不安定核をレーザー冷却・ トラップ技術やイオントラップ技術によって高真空中に捕獲し、ここから反跳した娘核を検出器で 捉えて運動量を求める手法がある [49]。R 相関の測定は、中性子を使ったものでは、PSI での実験が 知られており、その結果は $R(n) = (4 \pm 12 \pm 5) \times 10^{-3}$ という制限を与えている [50]。原子核を使っ たものでは、やはり PSI で実施されたもので、 $R(^{8}\text{Li}) = (0.9 \pm 2.2) \times 10^{-3}$ の制限が与えられてい る [51]。

一方最近、中性子と原子核の共鳴吸収反応における時間反転対称性の破れを探索する実験が検討 され始めた。歴史的には、中性子と原子核の共鳴吸収反応において、パリティの破れが核子核子相互 作用の非対称度に比べて最大で 10⁶ 倍増幅されて観測されたという事実がある [52]。これは理論的に は、パリティを破る相互作用が、原子核の波動関数の部分波間の干渉によって大きく現れると説明さ れている。CP の破れも同様に増幅される可能性が理論的に示唆されており [53]、J-PARC の大強度 ビームを利用すれば高感度で新物理を探索できる可能性がある。実現に必要な中性子・標的核の偏極 制御技術や高速中性子検出器などの R&D が開始されている。

- 格子 QCD によるハドロンの行列要素の計算 —

核物理的手法による物理量と基礎物理を理論的に関係付ける場合、ハドロンレベルの寄与の 理論計算が必ず求められる。ハドロンの過程の記述は量子色力学 (QCD)の非摂動的効果により 現在でも大変難しく、格子 QCD シミュレーションによる数値計算が唯一のそれらを定量化する 方法である。近年の計算機の計算能力の進歩により、核物理的手法による物理量の計算におい て必要なハドロンの行列要素の数値の精度は飛躍的に向上した。重要な例として、核子のシグ マ項 ($m_q\langle N|\bar{q}q|N\rangle$)がある。核子のシグマ項は暗黒物質の直接探索における原子核と暗黒物質 の相互作用に関わる他、原子の EDM、ベータ崩壊、 $\mu \to e$ 変換などに効く semi-leptonic 相互 作用の計算、そして一部の2重ベータ崩壊を起こす模型の解析において必要不可欠である。格 子 QCD においてこれまで難しかった物理的なパイオン質量 ($m_{\pi} = 135$ MeV)におけるシグマ 項の計算が最近可能となった。一方で、シグマ項はハドロン物理の観点で現象論的にも精力的 に研究されているが、その計算結果は格子 QCD の結果との間に 2 σ 程度のずれが見られ、今後 も研究が必要である。

他の重要な例として、CP 対称性を破るクォーク・グルーオン多体相互作用による核子の EDM の計算が挙げられる。これらの行列要素は現象論的に求めることが難しい場合が多く、格 子 QCD による数値計算がほぼ唯一の計算方法である。特に精力的に研究がなされているものと してクォークの EDM や QCD-θ 項によって誘起される核子の EDM の計算があるが、その理論 的不定生が 10% のレベルの精度まで精密化されており [47]、今後の計算機の進歩によって他の CP 対称性を破るクォーク・グルーオン多体相互作用のハドロン行列要素の計算の定量化が期待 される。

最後に、格子 QCD の計算が活躍する項目として、ミューオンの異常磁気モーメントに寄与 するハドロン真空偏極の計算が挙げられる。ミューオンの異常磁気モーメントはレプトンによ る過程であるが、その精密測定においては量子補正に対してハドロンの過程が効き、理論計算 における最も大きな誤差の原因となっていた。最近、格子 QCD によるハドロン真空偏極の計算 はチャームクォークを含めて物理点にて行われており、その誤差は現象論による計算の誤差に肉 薄している [48]。

8.3.3 今後の展望

中性子EDM

UCN 密度の向上が鍵であり、5年を目標に高密度 UCN 源の開発が計画されている。阪大 RCNP と KEK のグループがカナダ・TRIUMF と共同し、超流動ヘリウムを用いた UCN 源を TRIUMF に 設置した(図 8.8)。2016 年までに UCN 源専用陽子ビームラインの建設し、核破砕ターゲットへの照 射、液体・固体重水モデレータによる冷中性子生成を行った。2017 年には UCN 生成に成功している [26]。TRIUMF の 20kW 大強度陽子ビームを最大限に利用するためのアップグレードを行っている。 陽子ビーム照射時の放射熱を取り去り、超流動ヘリウムを安定して低温に保つための大型ヘリウム冷 凍器開発を進めている。また、前段の固体重水モデレータを液体重水素モデレータに変更することに より、UCN 生成に貢献する冷中性子束を増加させる。これらのアップグレードにより 1000 UCN/cc の高密度を達成する。一方 KEK、名古屋大を中心としたグループは、J-PARC の大強度ビームによる UCN 生成と EDM 測定を提案している。J-PARC の大強度陽子ビームは瞬間強度が強く、直接 UCN を生成した時点では非常に高い密度を達成している。従来 UCN は発生位置からガスのように拡散し 蓄積容器に到達するものを用いるだけだったが、同グループは高性能中性子光学デバイスを用いて UCN を高効率で輸送し EDM 測定容器内の UCN 密度を向上させることを計画している [28]。このよ うな中性子制御デバイスの開発に関して日本は世界をリードしており、現在 R&D が進められている。



図 8.8: TRIUMF UCN ビームライン

大強度加速器中性子源と中性子光学の活用は、従来を大きく凌駕する高統計実験を可能にする。 すでに中性子寿命測定、冷中性子回折及び熱外偏極中性子光学における対称性、中性子散乱 や干渉を用いた未知相互作用の探索など様々な基礎物理実験が J-PARC で行われている [88]。 これら基礎物理実験に革新をもたらす次世代中性子源の検討が始まっている。極冷中性子中性子 減速体や高効率反射材の開発によって例えば長基線ビームによる中性子反中性子振動探索による バリオン数非保存の検証など、全く新しい展望が拓ける可能性がある。

原子EDM

原子核内の P.T を破る効果を見ることができる反磁性原子の中で、精密測定が期待できる電子ス ピンがゼロで核スピンが1/2の系に限ると、これからも対象原子はまずは129Xeと199Hgであると思 われる。同様の性質を持つ³He は、系統誤差を抑制するために、同時測定で利用される共存磁力計 用の原子として用いられる。単純なモデルでは Z の大きな ¹⁹⁹Hg の方が大きな原子 EDM が期待で きるが、現在核構造の違い等を反映したより信頼度の高い理論計算が行われている。これらの原子系 での EDM 測定においては磁場変動による系統誤差をいかに抑制するかが重要である。¹⁹⁹Hg、¹²⁹Xe 実験ともに歳差周波数変動に関する調査研究、磁場変動を抑制する新たな手法・装置の開発が現在行 われている。現状では歳差継続時間数百秒の測定を多数回繰り返して積算したデータから、統計解析 により 0.1 pG 以下の磁場変動に抑えている (¹⁹⁹Hg 実験) と結論付けているが、今後は実際の変動を 0.1 pG 以下に抑えながら測定を続けられる実験手法の確立が重要と考えられる。そのため、原子ス ピンを利用した高感度磁力計の開発、また磁力計を EDM 測定セル内で動作させる共存磁力計の研究 がより重要になってくる。その他磁気遮蔽の改善、レーザーの高度安定化、スピン緩和抑制のための 表面物理研究も必要である。特にスピン緩和抑制の研究は EDM 感度、磁力計の感度に直接関わる点 であり、重要な研究開発事項である。今後10年間は上記開発研究が行われ、実験技術の進展により、 10⁻³⁰e・cm 以下の EDM 測定感度の実現が期待できる。しかし ¹⁹⁹Hg の EDM 実験では現状で 10ヶ 月程度のデータを用いて EDM の上限値を更新したが、統計精度が支配的な状況である。従ってこの 精度を改善するには、減衰信号を積算する従来の測定手法よりもメーザー発振による連続歳差測定手 法が効力を発揮すると考えられる。

以上のような高精度実験によって EDM の上限値を大きく更新できれば、例え有限値を決定できな かったとしても、SUSY 模型等における CP 非保存位相への厳しい制限から標準理論を超える物理に 対する理解が深まることは間違いない。また観測される原子 EDM と核子間 P,T-odd 相互作用また は核子 EDM を結びつける理論的研究もより進んだ計算手法により発展することが期待できる。上 記反磁性原子 EDM の実験研究は大型施設を必要としないが、原子分子物理から素粒子物理に渡る異 分野間の横断的連携が必要であり、高精度測定が要求されるため、長年の技術の蓄積、熟練した実験 者、継続的な予算獲得が必要である。

さらに、重い不安定元素として Ra や Rn などのように、対称性の破れが 2-3 桁ほど増幅されて 大きな原子 EDM が期待される原子系も存在する。これらはアメリカ・Argonne (²²⁵Ra)、カナダ・ TRIUMF(²²³Rn) で計画されており、最終的には 10⁻²⁸ e·cm 台の原子 EDM 感度が目標であり、CP 非保存パラメータへの感度において Xe, Hg の実験と同等レベルに達すると予想される。特に ²²⁵Ra は核スピンが 1/2 で、寿命も 15 日と長いことから特に期待されており、最初の EDM 測定実験も行 われた [54]。またもうひとつの方向として、蓄積リングにおけるイオン系の EDM 測定も計画案が検 討されている(アメリカ・BNL における陽子、重陽子 EDM 実験等) [55]。これから多くの R&D が 必要ではあるが、この系では軌道電子による遮蔽が無く電場と EDM の相互作用を直接見ることがで きる [56] ことから、将来の展開が期待される。今後 10 年は現在提唱されている装置の改良・新たな 実験手法・系統誤差抑制法の R&D が上記の色々な系について行われる。安定核については系統的に 測定上限値が下がっていき、不安定核・イオン系については実験データの収集が開始されることが期 待される。

常磁性原子を用いた実験に関しては、電子 EDM の増幅度が極めて高くなる重い放射性元素を EDM 探索対象にすることが考えられる。国内には多くの特徴をもった中小規模加速器施設が存在し、様々 な放射性元素を大強度で生成する可能性を秘めている。東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトー プセンター(CYRIC)では、原子番号最大のアルカリ原子である放射性元素フランシウム(Fr)を 生成し、オンラインで引き出してレーザー冷却・トラップすることで Fr の各種性質を精密測定する 研究を進めている [57, 58, 59]。Fr は大強度重イオン源からの ¹⁸O ビームと ¹⁹⁷Au 標的による融合 反応により生成し、高強度レーザーにより冷却・トラップ、光格子中への蓄積を行って EDM を測定 する。CYRIC で保有するビーム回転電磁石(Swinger 磁石)を活用し、一次ビームを上方から標的 に照射することで、ターゲットを融点以上に維持したまま液体の状態で Fr を生成・引き出すという 特徴ある方法を確立し、Fr 生成量 ~ 10⁶ Fr⁺/s を実現しており、さらに一次ビーム強度を増強する ことで、~ 10⁷ Fr⁺/s の収量を得る予定である。これは、世界最高強度を誇る CERN・ISOLDE の 10⁸ ~ 10⁹ Fr⁺/s には及ばないものの、専用のビームラインを備えているため、長期の測定が可能で あり、大強度 Fr 源を有する国際的な基礎物理研究拠点となり得る。それに対し、ISOLDE では原子 核構造研究の実験プログラムが極めて多いことから、長期のビームライン占有を必要とする基本対称 性・相互作用の実験を行うことは、現状では非常に厳しいと言える。海外ではイタリア・LNL [60] や カナダ・TRIUMF [61] でも Fr ビームが得られ、レーザートラップ実験を推進しており、相補的に研 究協力体制を整えている。CYRIC では、Fr の EDM 探索を推進する他、レーザー冷却された Fr を用 いて、核子間における弱い相互作用の伝播機構を探るためのアナポールモーメント測定 [62] や、電 気四重極遷移に顕現し得る新しい物理現象の探索 [63] 等のパリティ非保存現象の研究も視野に入れ ている。



図 8.9: 反磁性原子 EDM 実験で今後必要になる実験技術

最近では、東京大学原子核科学研究センター(CNS)でも、Fr のような不安定原子をレーザー冷 却する研究が始まっている。CNS では、今後10 年程度で、理研仁科センターの AVF や RILAC 等の 加速器から得られる大強度ビームを活かし Fr 原子数を格段に増強して、フェッシュバッハ共鳴によ り原子間力を制御して生成する Fr-Sr 極性分子を使った超高感度な電子 EDM 探索 [64] や、Fr のボー ズ・アインシュタイン凝縮状態の実現に伴う更なる高精度 EDM 探索技術の開拓を推進する。さらに、 Fr は多くの同位体を加速器で生成することが可能であり、中性子数が多くなるとともに、原子核の 8 重極変形の効果が大きくなることが予想されている。前述したように、²²¹ Fr/²²³ Fr は 8 重極変形効 果が大きく、原子核の Schiff moment を通じた CP 非対称項の寄与が格段に増幅されることが理論的 に予測されている。一方、²¹⁰ Fr は電子 EDM の寄与が支配的であると予想されている。共存光格子 EDM 測定を、²²¹ Fr/²²³ Fr/²¹⁰ Fr に対して実現することで、系統誤差を抑制して、電子 EDM、原子 核 EDM、CP を破る相互作用の寄与を分解することが検討されている。同時に、Ra や Rn をはじめ とする多彩な放射性同位元素(RI)を生成できる特徴を活かした原子核 EDM 研究の展開も図ってい る。また、CNS と CYRIC とで連携して、EDM 増幅度の高い冷却 RI や RI 分子等を用いて、レプト ン EDM、クォーク EDM をフレーバーごとに分解することを目指し、様々な不安定原子の EDM を 系統的かつ戦略的に測定していく計画である。

20 年後には、原子核、電子双方の研究が進み、原子 EDM の起源の詳細について(核子間 P,T-odd ポテンシャル、核子 EDM、電子-核子 P,T-odd ポテンシャルが各々どのように原子系に現れるかを 定量的に)研究することが可能になると思われる。また、高エネルギー物理実験における新粒子デー タ、暗黒物質・暗黒エネルギーに関する研究データと突き合わせて、統合的な物理法則・宇宙の理解 を深めることができる。

原子核反応

ベータ崩壊の角相関項測定実験としては現在、立教大学を中心とする研究グループがカナダ・TRI-UMF の ISAC ビームラインを利用した MTV 計画を推進している [66]。R 相関を求めるためには、 親核のスピン、電子の運動量と、電子のスピンが必要になる。電子スピンのうち、電子運動量と平行 な縦偏極成分は G 相関に寄与し、ベータ線のヘリシティそのものと言える。電子スピンの横偏極成 分のうち、核スピンと平行な成分は、N 相関に寄与し、これもパリティ対称性を破るものである。そ して、核スピンと垂直な電子スピンの横偏極成分が、時間反転対称性を破る R 相関に寄与する。こ の電子の横偏極成分を測定するためには、Mott 散乱がもつ偏極解析能が利用される。MTV 計画で は、偏極した ⁸Li から生じるベータ線が、鉛のような Z の大きい材質の箔と Mott 散乱する様子を、 飛跡検出器を使って精密に観測することで、従来のシンチレーションカウンタを使った実験より高精 度に、R 相関を決定することを目指している。既に、統計精度では Huber らの結果を凌駕しており、 今後、系統的効果の調査を行いながら、世界最高精度での時間反転対称性の破れの探索を行ってい く [67]。将来的には、娘核とベータ線との電磁相互作用(終状態相互作用)を詳細に測定するための 核種依存性の調査や、ベータ崩壊におけるローレンツ不変性の破れの探索も視野に入れられている。

8.4 ミューオン異常磁気能率・ミューオニウム超微細構造分裂の精密測定による標準理論 の検証と標準理論を超える物理の探索

8.4.1 分野の現状

ミューオンを用いた精密測定の研究テーマは、標準理論から極めて高精度で予測することができ る基礎定数を精密測定することによる物質の起源・時空の対称性の破れの探索である。ミューオン の異常磁気能率 (g-2)、EDM および荷電レプトンフレーバー数非保存過程はいずれも量子補正の効 果として多様な物理過程が関与する物理量である。超対称性粒子などの未知の粒子・相互作用の寄与 が量子補正として顕著に現れることが予想されている。

g-2は標準理論におけるすべてのゲージ相互作用による量子補正効果が包含される。初期の実験 では QED のベンチマークに用いられ、その後の実験では、精度が向上し電弱相互作用の精密検証が 行われた。近年はさらに実験精度およひ標準理論の予想値の計算精度が向上し、未知の粒子・相互作 用に感度を持つレベルに達している。現在はg-2 Theory Inititative という理論計算の国際共同研 究グループが発足し、複数グループによる理論計算の相互確認や新しい手法による計算の高精度化が 進んでいる。2020 年 6 月にg-2の標準理論の計算に関するホワイトペーパー [68] を出版し、理論 計算値の信頼性がさらに高まっている。

荷電レプトンフレーバー数非保存過程は標準理論では禁止されているため、クリーンな環境で未 知の粒子・相互作用を探索することができる。この過程は*g*-2に比して、荷電レプトンフレーバー 数を変化させる過程を含むため、*g*-2の測定と合わせてフレーバー構造に関する知見を得ることが できる。また、ミューオンが EDM を有すると、レプトンセクターにおいて CP 非対称が存在するこ とを直接示すことができる。ミューオンの EDM はレプトンセクターの CP の破れを直接探索できる という点で、原子核やハドロンをプローブとした EDM や CP 非保存現象の測定に比べて相補的であ る。0*v*DBD 探索でレプトン数の非保存が発見されると、レプトンセクターでの CP 非保存は、レプ トジェネシスシナリオにおける宇宙の物質・反物質の非対称を解明する手掛かりになる。

米国ブルックへブン国立研究所で行われた E821 実験では直径 14m のミューオン蓄積リングを用 いてミューオンg-2を世界最高精度 (0.54 ppm) で測定することに成功し、g-2が標準理論の予想 から 3.4 σ 大きいと報告された [69]。このズレを自然に説明できる理論として超対称性理論が有力で ある。この結果は標準理論のほころびを示唆し得るものであるにもかかわらず、追試した実験はまだ なく、独立な実験による検証が望まれている。同様にミューオニウム超微細構造分裂 (HFS) も標準 理論から精度良く予想することができる。HFS に対する理論計算の精度は超対称性粒子などの効果 が表れるところまで至っていないが、将来的に標準理論の予測値をg-2と独立に検証できる可能性 のある物理量として重要である。

ミューオン g - 2の標準理論からのズレは、標準理論を超える物理法則を紐解くための道しるべ (スタンダードキャンドル)である。LHC 実験でヒッグス粒子以外の新しい粒子は未だ見つかってい ない。今、暗闇の中を暗中模索することなく、新しい道しるべを確立することが重要である。統計的 に考えれば 3σ のズレが起きる確率は小さいが、歴史を振り返ると 3σ 以上の"発見"報告が追試でき なかった例が多い。ミューオン g - 2の測定は、相対誤差 0.5 ppm という超精密測定である。今、全 く新しい実験技術を用いて 0.1 ppm の誤差で測定を行い、このズレが本当かどうか決着をつける実 験が J-PARC で計画されている [70]。

8.4.2 最近の進展

E821 実験の結果を契機に g-2の標準理論による理論計算の精度が年々上がってきている。g-2の 計算において、光子がハドロンと結合する項の不定性は実験データの精度によって決まっているが、 近年 BaBar (アメリカ・SLAC)、KLOE (イタリア・INFN・DAPHNE)、BES-III (中国・BEPC) な どの高ルミノシティ電子・陽電子衝突実験によってこの不定性を減らす試みがなされてきた。今後は 新しい B ファクトリー (KEK) や低エネルギー電子・陽電子衝突実験 (ロシア・VEPP2000、中国・ BES-III) でさらに精度の高いデータが得られると予想される。また、QED の高次の補正項について はすでに十分に高い精度で計算されている。近年はハドロンの寄与についての格子 QCD による理 論計算が進展している。

また近年はスイス・PSI において荷電レプトンフレーバー数の非保存過程 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊の探索実験 (MEG 実験) が進んでいる。MEG 実験は、すでに前人未踏の感度に達しており、荷電レプトン数の非 保存過程がいつ発見されてもおかしくない状況にある。これに合わせて相補的な物理量であるミュー オン g - 2 や EDM の測定精度を向上させることで、より効率的に研究が展開できると考えられてい る。次世代の荷電レプトンフレーバー数非保存過程探索実験として、原子核を用いたミュオン電子変 換過程の探索実験 COMET、DeeMe(大阪大学・KEK)や Mu2e(アメリカ・Fermilab)などが計 画されている。

8.4.3 今後の展望

ミューオン基礎物理を巡る新たな動向を受け、米国ではブルックへブン国立研究所にあるミューオン蓄積リングをフェルミ国立研究所に移動し、E821 実験と同じ手法を踏襲して *g* – 2 を 0.14ppm の 精度で測定する実験が進行している(Fermilab *g* – 2 実験) [71]。 EDM も同時に探索することがで き、その測定感度は E821 実験の 100 倍に向上する見込みである。

一方、日本では J-PARC の物質・生命科学実験施設内のミュオン科学実験施設が世界最大強度のパ ルスミューオンビームを供給している。この大強度ミューオンビームを用い、E821 実験や Fermilab g-2実験とは全く異なる手法によりミューオン g-2・EDM の精密測定を行う計画が KEK・理化 学研究所のグループによって進行している。(図 8.10)。数 ~5 年間の間に新しいビームラインおよび 実験装置の準備・建設を行い、約1年間の測定で g-2のズレの検証、および EDM の探索を行う計 画である。

J-PARC ではレーザー共鳴解離法によって超冷ミューオンビームを生成し、直径 66cm の超精密磁 場中に蓄積、シリコン飛跡検出器で崩壊を捉えることにより、ミューオンg-2を0.1ppm の精度で測 定する。一様磁場中で歳差運動するミューオンは、運動方向に対するスピン歳差運動の周期がg-2 と磁場に比例することが知られている。スピン偏極したミューオンは崩壊時にそのスピンに沿って高 いエネルギーを持つ陽電子を放出するので、高いエネルギーの陽電子の時間分布を測定し、かつ磁場 を精密に制御することによりg-2を測定することができる。

また、ミューオンのスピンは EDM によっても回転し得るが、その回転軸は g-2とは直交してい るため、g-2歳差運動との分離が可能であり、実験では崩壊の上下非対称を測定することにより探 索できる。今後は Fr を用いた電子 EDM の測定などと連携することで、レプトンセクターの CP の 破れに関する研究が前進することが予想される。



図 8.10: J-PARC のミューオン g-2・EDM の精密測定実験

ミューオン g - 2/EDM 精密測定実験は、平成 21 年 12 月に実験提案書 [72]、平成 23 年 12 月に実 験概念設計報告書、平成 27 年 7 月に実験技術設計報告書が J-PARC 原子核素粒子共同利用実験審査 委員会へ提出され、平成 29 年 11 月に KEK 素粒子原子核研究所、平成 30 年 2 月に物質構造科学研 究所の stage 2 課題としてそれぞれ採択された。

同じく J-PARC においてミューオニウムの HFS を精密測定する実験が進行中である。この測定で はミューオニウムを精密磁場中で生成させ、RF を用いて HFS の遷移を誘導し、スピン共鳴による崩 壊角度分布の変化を測る。J-PARC の大強度表面ミューオンビームラインを用いると、ロスアラモス 国立研究所で行われた先行実験に比して 300 倍の統計量を取得できる見込みである。g-2・EDM の 測定と同じビームライン設備を共用できること、極めて精密な磁場制御技術を要することなど g-2・ EDM の測定と共通する R&D 項目が多いことに加え、g-2測定で用いる NMR 磁場測定値を校正す るために必要なパラメータである μ_{μ}/μ_{p} も精密に決定できるため、g-2・EDM 測定と密接に関連 している実験である。数年の間に J-PARC に新しいビームラインを建設し HFS 測定実験を開始し、 段階的に g-2・EDM の測定へシフトすることが検討されている。

8.5 ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊(0*ν*DBD)探索によるマヨラナ性検証と ニュートリノ質量測定実験

8.5.1 分野の現状

二重ベータ崩壊とは一つの原子核の中で同時に2回のベータ崩壊が起こる現象であり、ニュートリノを放出する 2*v*DBD と 0*v*DBD の2 種類が考えられる。

$$2\nu \text{DBD}$$
 : $(A, Z) \to (A, Z+2) + 2e^- + 2\bar{\nu_e}$ (1)

(2)

 $0\nu \text{DBD}$: $(A, Z) \to (A, Z+2) + 2e^{-1}$

前者はニュートリノを放出する通常のベータ崩壊が同時に2回起こる現象で、素粒子標準理論の2次 の摂動の過程として起こりうる。後者は同様に同じ原子核で2つのベータ崩壊が起こるが、放出され た反ニュートリノがマヨラナ質量項を介してニュートリノに転換し、別の中性子に吸われ電子のみを 放出する過程である。この過程は反応の前後でレプトン数が保存しておらず、標準理論では許されて いない。レプトン数とは、レプトンが+1、反レプトンが-1と定義されており、0ルDBDではレプトン 数が増加していることが分かる。これらの過程をファインマンダイアグラムで表すと図 8.11のよう になる。

0ν**DBD実験の第一の目的は、ニュートリノがマヨラナ粒子であるか否かを検証することであ る**。0νDBD が観測されれば、ニュートリノがマヨラナ粒子であることを意味し、レプトン数の非保 存を示すことになる。これは、「現在の宇宙における物質・反物質の非対称性問題」を解くシナリオ が、レプトジェネシスであることを強く示唆することになる。また、0νDBD の半減期の逆数は以下 のように表される。

$$|T_{1/2}^{0\nu}|^{-1} = G_{0\nu}(Z,Q) |M_{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$
(3)

ここで、*G*_{0ν} は位相空間因子で、およそ*Q*値(放出されるエネルギー)の5乗に比例し、*M*_{0ν} は核行 列要素で原子核毎に計算する必要がある。また、〈*m*_{ββ}〉は電子ニュートリノの有効マヨラナ質量であ り、0νDBD の半減期を測定することにより決定することができる。0vDBD は半減期が 10²⁶ 年以上 という非常に稀な現象であり、大量の標的核、極低バックグラウンド環境を用意する必要がある。後 者に関してはニュートリノを放出する 2vDBD が究極的にバックグラウンドとして残るため、図 8.12 に示す通り、高いエネルギー分解能によって分離することが重要となる。

目標感度は、〈*m_{ββ}*〉を使って表すことが多いが、ニュートリノの質量の階層モデルによって次の3 つになる。

- 1). 縮退型; $\langle m_{\beta\beta} \rangle \geq 100 \text{meV}$ 、
- 2). 逆階層型; $\langle m_{\beta\beta} \rangle \sim 20 \sim 50 \text{ meV}$ 、
- 3). 順階層型; $\langle m_{\beta\beta} \rangle \leq 3 \sim 5 \text{ meV}$ 。

現在、日本を含め世界中で 0ルDBD 実験が行われ、あるいは計画されている。図 8.13 に示す通り、1) の領域は、現在世界最高感度を達成している KamLAND-Zen 実験によって探索されている。また、 数年後の稼働を予定する計画は、2) を目標として装置の R&D を行っており、逆階層で発見できな かった場合、最終的には 3) を目指す必要がある。



図 8.11: 2νDBD(左)と 0νDBD(右)のファインマンダイアグラム。図の中央、× の部分で、反 ニュートリノとニュートリノの転換が起きている。



図 8.12: ⁴⁸Ca の二重ベータ崩壊(0*ν*DBD と 2*ν*DBD)に伴って放出されるベータ線のエネルギース ペクトル。*ν* 質量を 5 meV と仮定している。エネルギー分解能が良いほど程、2*ν*DBD からのバック グラウンドのしみ込みは少なくなり、感度は高くなる。



図 8.13: ニュートリノ質量の階層モデル [73]。横軸は最も軽いニュートリノの質量で、縦軸はマヨラ ナニュートリノ質量である。ニュートリノ振動実験の結果から、色付きの領域に制限されている。IH と書かれた帯が逆階層、NH と書かれた帯が順階層、両者が重なっている部分が縮退型である [74]。 各原子核毎の感度を右に載せている。現時点で、¹³⁶Xe を用いた KamLAND-Zen 実験によって、図 中の KamLAND-Zen と書かれた領域より上は排除されている。リミットに幅があるのは、核行列要 素の不定性によるものである。

0νDBD を起こす可能性のある原子核は多数あるが、観測のバックグラウンド (BG) となる環境放 射能の影響を避けるため、反応の Q 値を考慮すると、現実的な候補核としては約 10 種類程度に絞ら れる。これら候補核とその特徴に合った実験技術とを組み合わせて計画が立案されている。一方で、 観測値である半減期から 〈m_{ββ}〉を求める際に使用される核行列要素に理論的な不定性があるため、実 験的にも複数の原子核を標的として実験を行うことが要請される。また実験手法としては、検出器中 に標的原子核を含み、検出効率は高いが、BG 弁別能は低い熱量計タイプと、フォイル状にした標的 原子核をトラッキング検出器で挟み込んだ、検出効率は低いが BG 事象の弁別能力に優れたトラッキ ングタイプの2種類がある。現在、世界的に見て高感度の結果を出している実験は、いずれも熱量計 タイプの検出器を用いたものである。

、ニュートリノのマヨラナ性とレプトジェネシス —

スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノ振動実験によって、1998年にニュートリノ が質量を持つことが示された [75]。ニュートリノは左巻き、反ニュートリノは右巻きしか観測 されていないが、これを説明するのに元々の標準理論ではニュートリノ質量がゼロであるとさ れていた。もしニュートリノに質量があるとすれば粒子の速度より速く動く座標系に変換でき、 そのとき左巻きは右巻きに見えるはずだが、右巻きがないということからニュートリノは光速 で走っているという考え方である。しかし、ニュートリノに極めて小さいながら質量があるこ とが明らかになり、この仮説は成り立たないことが分かった。

ニュートリノが質量を持つにも関わらず右巻きがないことから、ニュートリノを粒子と反粒 子が転換可能なマヨラナ粒子であるとする説が現実味を帯びてきた。標準理論では物質を構成 する粒子はクォークとレプトンの12種類であるが、その中でマヨラナ粒子の可能性を持つのは 電荷を持たないニュートリノだけである。ニュートリノがマヨラナ粒子であるとすると、右巻き と左巻きの粒子にそれぞれ別々の質量項を与えることが出来、右巻きと左巻きで違う質量を持 つことが許される。その結果、GUT スケールの非常に大きい右巻きの質量を仮定することで、 現在観測されている左巻きの極めて小さいニュートリノ質量や右巻きのニュートリノが観測さ れない理由を自然に説明することが可能となる。これをシーソー機構 [76] と呼び、ニュートリ ノがマヨラナ粒子であることが支持されている理由の一つである。

また、我々の宇宙が物質のみで出来ている理由もニュートリノのマヨラナ性と CP の破れか ら説明することが可能となる。宇宙初期の高温状態で作られた右巻きニュートリノの崩壊がレ プトン数を保存せず、CP の破れから僅かに反レプトンを優勢にする。そしてインスタントン効 果やスファレロン過程といった、バリオン数とレプトン数の差(B-L)を保存する過程によって 反レプトンをバリオンに転換し、バリオン(物質)が作られたというもので、レプトジェネシ スシナリオと呼ばれている [77]。レプトン CP の破れは日本の T2K 実験によって示唆されてお り、後はニュートリノのマヨラナ性を示せばレプトジェネシスシナリオによって物質優勢宇宙の 謎が解ける。



図 8.14: CANDLES (左) と KamLAND (右) の概念図。サイズとしては、CANDLES の外水槽は 直径 3 m × 高さ 4 m で、KamLAND のステンレス球形タンクは、直径 18 m である。

8.5.2 最近の進展

日本では、大阪大学の一連の ELEGANT 装置などによって、いくつかの標的核で 0 ν DBD 実験が 行われてきた。現在稼動している実験では大阪大学 CANDLES 実験(⁴⁸Ca)と、先述の東北大学 KamLAND-Zen 実験(¹³⁶Xe)がある。この2つの実験はいずれも熱量計タイプで、岐阜県飛騨市の 神岡鉱山内の地下実験室に建設されている。先述の通り、KamLAND-Zen 実験は 2020 年現在で世界 最高感度の 0 ν DBD 探索を行っており、その半減期下限値は $T_{1/2} \ge 10^{26}$ 年である。

また、現在準備中の実験としては、KEK の DCBA/MTD 実験(¹⁰⁰Mo, ¹⁵⁰Nd 他)が比較的大型 のプロトタイプ装置を製作している他、京都大学が進める AXEL 実験(¹³⁶Xe)が TPC を用いた新 しい実験を準備している。宮城教育大学が提案する ZICOS 実験(⁹⁶Zr)では、ジルコニウム錯体を 含有した液体シンチレータの開発を行っており、いくつかの計画が R&D をすすめている。さらに、 海外の実験(NEMO-3 実験;トラッキング型)や計画(SuperNEMO 実験など)に参加している研 究者もいる。いずれの計画も感度向上のために、大量の標的原子核を用意し(検出器の大型化)、検 出器の BG の低減を図っている。

8.5.3 今後の展望

0vDBD 実験は宇宙線や環境放射線が測定の BG となる。それ故、実験装置は、宇宙線や宇宙線由 来の放射能の影響を避けるべく地下実験室内に設置し、環境放射線に対する遮蔽(鉛・銅・水など) を備える必要がある。日本で、原子核実験分野で使用されている地下実験室としては、先述の神岡 地下実験室がある。岐阜県飛騨市神岡鉱山内の地下実験室は、現在は東京大学・東北大学の2大学に よって運営されており、実験所としてのインフラは十分に整っている。海外では、エレベータによる 垂直アクセスが必要な地下実験室も多い中、神岡は水平アクセスが可能な点が大型装置の建設・運営 に当たっては大きな利点となる。他に 0vDBD 実験のような稀現象実験に必要な条件を列挙すると、 1) 宇宙線遮蔽の指標となる深度は 2,700m 水深相当、2) 実験室内に滞留するラドンガス対策として、 抗外空気の導入とラドンフリーエアーの供給、3) 安価で大量の遮蔽材として利用可能な十分な湧水 の存在、などがある。また、実験装置自体に含まれる放射性不純物も BG の原因となるが、材料の不 純物を分析する装置などの環境も多くの実験で整備されている。日本では、神岡地下実験施設内に低 BG 技術の R&D を行う実験室が整備され、実際に運用が開始されている。また、測定された材料の 不純物濃度等の情報を共有するデータベースも整備が進んでいる。

新たに大型実験装置を設置する際には、現在の実験室を再利用するか、それが手狭な場合は鉱山内 に新たに実験室を掘削することも可能である。実際に暗黒物質探索実験や重力波観測実験などの利用 も増えており、実験室は拡張が進んでいる。一方で、断層などの地盤の問題や湧水などの存在により、 掘削可能な場所はある程度限られており、より大型の装置が必要になってくる中で、適地が減りつつ あるのもまた事実である。また一般的にはより高感度の実験にはより大深度の実験室が必要になる。

海外では、欧州にいくつかの地下実験室があり、多くの成果を上げてきた。日本の研究者も参加し ている NEMO-3 実験はフランスの LSM(4,800 m 水深相当)に設置されている。イタリアの LNGS (3,800 m 水深相当)とカナダの SNOLAB(6,000 m 水深相当)は、大体積の実験室を持っており、 0ルDBD、暗黒物質、大型ニュートリノ実験等、多種の実験をホストしている。さらにこれらと同程 度もしくは、より深い深度を持つ、米国の Sanford Lab.(4,850 m 水深相当)や中国の CJPL(6,700 m 水深相当)などが建設された。このうち特に CJPL では水平アクセスが実現されている。2010 年 に出来たばかりで実験の数は多くないが、暗黒物質探索を行っている PandaX 実験や CDEX 実験な ど動き始めたものもある。

ニュートリノ質量の階層構造が順階層、逆階層、縮退型の3つのうちのいずれであるかは、現時点 ではわかっていないため、0*ν*DBD実験は運が良ければ、ここ数年以内に縮退または逆階層領域で観 測ができるかもしれない。そうでない場合には、最終的には順階層領域まで探索を広げる必要があ る。ここ数~10年程度の縮退・逆階層型質量を目標感度とした実験では、神岡地下実験室を積極的 に利用していくが、将来の順階層型までの高感度実験を考えると、国内での(神岡の拡張も含めた) より大深度実験室の整備か、海外の地下実験室の利用を視野に入れる必要がある。

また、最終的な順階層領域までの実験を行う上では、大量の標的原子核を用意する必要がある。こ れは実験装置の大型化と、同位体濃縮による。特に現在国内で行われている実験のうち、¹³⁶Xe は常 温で気体であるため同位体濃縮が容易で、KamLAND-Zen 実験は現時点で濃縮されたものを使用す る。KamLAND-Zen 実験は Xe の量を 400 kg から 750 kg に増やした新しいフェーズの実験で、逆階 層領域まで探索範囲を広げることを目標としており、2020 年中に最初の結果を出す予定である。さ らに将来の計画として KamLAND2-Zen 実験が考案されており、液体シンチレータを発光量の大き い Linear Alkyl Benzene に変更するなどし集光率を上げ、キセノンを 1 トン以上用いて逆階層領域 を網羅する感度を目指しているが、具体的な予定は決まっていない。一方、⁴⁸Ca と ¹⁵⁰Nd は、今のと ころ大量生産可能な濃縮法が見つかっていない。しかし反応の*Q* 値は候補原子核中で最大 (*Q*(⁴⁸Ca) = 4.3 MeV) とそれに続く 2 番目 (*Q*(¹⁵⁰Nd) = 3.3 MeV) であり、BG 低減という面では非常に大き なポテンシャルを秘めている。⁴⁸Ca の自然存在比約 0.2% というのは実験上の弱点ではあるが、見方 を変えれば、同じ検出器サイズ(すなわち同一の BG レベル)で 500 倍の感度の改善の余地がある。 ということであり、適切な同位体濃縮法の確立によって、感度が飛躍的に向上する可能性がある。

⁴⁸Ca, ¹⁵⁰Nd ともに、常温で気体の物質によく利用される遠心分離法による濃縮が行えないため、 別の手法を探る必要がある。⁴⁸Ca に関しては、国内でクラウンエーテルを使用した化学的手法とレー ザーを用いた光学的手法、さらにはイオンの移動度の差を用いた電気泳動法、等を用いた濃縮法の R&D が行われている。特に電気泳動法では6倍の濃縮度を達成しており [78]、現在、濃縮度を高め るための改良や大量生産のための大型化を行っている。最終的に 10 kmol の ⁴⁸Ca を生産する場合、 原料として少なくとも 250 トンの ^{nat}Ca が必要になるため、工場レベルの生産設備を用意する必要が ある。これらを設置可能で、かつ、濃縮度や不純物濃度の測定装置などの R&D 設備を伴った実験施 設が望まれる。

前述のように、0vDBD研究では目標とするニュートリノ質量の階層モデルに応じて段階的に感度 向上を図っていく。感度向上のためには標的原子核の増量とBGの低減を同時に進める必要がある。 CANDLES グループでは、CaF2 結晶を 10 mK にまで冷却し、反応による温度変化と蛍光を同時に 測定する熱量蛍光検出器の開発を行っており、成功すればエネルギー分解能が一桁近く向上し同時に 粒子識別も可能となるため、劇的な感度の向上が期待できる。また核行列要素の不定性を考慮して複 数の原子核を標的として実験を進める必要もある。これらを国内外で相互に競争・協力関係のもと、 分担して行っていくことになる。

計画・予算について CANDLES 計画を例として話を進める。CANDLES 計画の次のステップとし ては、数トン~10トンクラスの^{nat}CaF₂を主検出器とした装置を建設し測定を行うとともに、並行し て大量生産可能な同位体濃縮(数%)法の R&D を進める。同位体濃縮法が確立すれば、⁴⁸CaF₂シン チレータを順次作成し、^{nat}CaF₂との入れ替えを進める。さらに R&D が進み、濃縮度が向上(10~ 数十%)すれば、同様に入れ替えを行っていく。予算としては、数トンスケールの^{nat}CaF₂シンチ レータ検出器の建設に 10 億円前後(CaF₂結晶のコストに依存する)を想定する。一方、同位体濃縮 に関しては、最終的に採用する手法に依存するが、どの手法であっても 0*ν*DBD 探索で使用可能なト ンレベルの同位体を生産するためには、大規模かつクリーンな環境のプラントが必須となり、数十億 円程度が見込まれる。

8.6 暗黒物質探索実験

8.6.1 分野の現状

暗黒物質(Dark Matter; DM)とは宇宙の全質量/エネルギーの内、27% 程度を占めると考えら れているが、未だにその正体が判明していない物質のことである(図 8.15)。宇宙初期に生成され、 現在の宇宙の大規模構造の形成に重要な役割を果たしたと考えられている。その正体としては原始 ブラックホールなども含めいくつかの候補が考えられているが、核物理に関連して興味深いものは理 論的に存在を予言されながら、未発見の粒子である。その性質は 1) 質量をもち、2) 安定または(宇 宙年齢に比して)長寿命であり、かつ 3) 中性である。有力な候補は 1) WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)、2)axion、3) その他 (hidden photon など) である。1) はさらに細分することがで き、超対称性理論から存在を予言されている LSP(Lightest Supersymmetric Particle) と、余剰次元 理論から予言されている LKP(Lightest Kaluza-Klein Particle) と、その他に分類できる。2) は強い 相互作用における CP の破れの問題 (Strong CP problem) を解決する理論によって予言されている粒 子であり、現在では「見えない」axion モデル(KSVZ[79], DFSZ[80] の二つの模型が代表的)が有力 である。(現在主流の)実験手法では、DFSZ axion モデルの方がより高感度での探索が必要である。

DM探索実験は、DMがWIMPsあるいはaxion、その他(またはそれらの組み合わせ)から なっていると仮定し、何らかの手法でその存在の証拠を掴むことを目標としている。銀河の回転速 度や重力レンズ効果など、近年の宇宙観測の進展によりDM、すなわち「見えない質量」の存在自体 はかなり確定的になった。その正体が、未発見の素粒子(それが WIMPs、axion のいずれか、また は別の粒子なのかは議論がある)であろうという点は、多くの研究者の一致するところである。これ



図 8.15: Planck 衛星 [81] などによる宇宙背景放射の精密測定、及びその他の結果から求められた宇 宙のエネルギー物質構成図。宇宙はそのほとんどが未知(暗黒エネルギー; 69% 、暗黒物質; 27%) であることがわかる。

らの粒子を検出するに十分な感度を持った探索装置を準備し、DM 構成粒子を発見することは急務で あり、実際に日本を含め世界中で多くの探索実験が稼働/計画されている。

核物理的手法による探索実験は、我々の銀河系のダークハローが DM から構成されていると仮定 して、地上/地下に設置された観測装置を用いて、これを直接検出する(直接実験)ことである。こ の他に地球・太陽・銀河系中心などに重力的に捕獲された DM の対消滅の痕跡を探す間接実験もある が、ここでは直接実験に絞る。地球近傍での DM の密度と速度は銀河系の回転速度の観測等から求 めることができ、それぞれ $\rho_{\rm DM} \sim 0.4 \text{ GeV/cm}^3$, $\beta_{\rm DM} \sim 10^{-3}$ とされている。また DM 粒子の質量 $m_{\rm DM}$ を理論模型に基づいて仮定すれば、地球近傍での数密度 $n_{\rm DM} = \rho_{\rm DM}/m_{\rm DM}$ が求まる。以下 1) WIMPs 探索、2) axion 探索について、述べていく。双方ともに超稀現象探索実験であるため、DBD 探索実験同様、S/N の向上が成否の鍵となる。

WIMPs 探索では、WIMPsとの弾性/非弾性散乱による、検出器を構成する原子核の反跳信号等 を検出する。この標的原子核は、WIMPsの理論模型を仮定(現在は超対称性粒子が主)したうえで、 相互作用の種類(スピンに依存する (SD) / しない (SI)。図 8.16 は SI に関するプロット)に応じて 最適なものを選択する。WIMPs の質量 m_{DM} は理論模型によるが数 keV~数 TeV 程度とされてお り、_{βDM} を用いて反跳信号のエネルギーは数~数+ keV 程度と見積もることができる。WIMPs 直 接探索実験では、このエネルギー領域における放射性雑音を極限まで下げたうえで、その上に現れ る WIMPs 起因の信号を探すことになる。このエネルギーは DBD 探索実験と比して相対的に低いた め、よりシビアな放射性雑音対策をとる必要があるが、一方で環境起因の放射性雑音の主成分である β/γ 線と異なる種類の信号(原子核反跳)であることを積極的に利用することも可能になる。具体的 には、地下に空気中や塵に付着したラドンやその娘核への対策を施した実験室を用意し、中性子を含 む環境放射線に対する十分な遮蔽体中に、放射性不純物の少ない材料を用いた大型の検出装置を設 置する。検出器としては、比較的初期においてはもともと不純物濃度が低い半導体検出器や、大質量 が可能な無機結晶シンチレータが主流であったが、その後特に低雑音化技術の進展に伴い、ボロメー タを経て現在は希ガス検出器がその座を占めている。現在(後述の一部の年周変化測定実験を除き) ほとんどの実験で WIMPs 由来の信号の発見には至らないという結果であるため、そこから WIMPs



図 8.16: いくつかの WIMPs 直接探索実験の結果(実線)(文献 [82] より)。グラフ最下部の"neutrino coherent scattering"と記された領域が「ニュートリノフロア」(本文参照)。

質量の関数として核子との断面積の上限値を求めている(図 8.16)。何らかの信号が得られた場合、 それが WIMPs 由来であることの証拠になるものとして、i) 年周変化、ii) 反跳方向がある。i) は、銀 河系の重力に捕捉された WIMPs の「海」の中を太陽が進み、地球はその周りを公転していることに 伴って起こる 1 年を周期とした信号スペクトルの変化である。夏・冬の信号スペクトルの微妙な違い が判別できるだけの大統計が必要である。ii) は、WIMPs の「海」の中を地球が自転・公転しながら 進むことによって生じる WIMPs の「風」向きを検出するもので、信号の反跳方向を記録できる検出 器が必要になる。世界の現状では、i) についてイタリアの DAMA/LIBRA 実験が、大質量の NaI シ ンチレータと 10 年以上にわたる統計でポジティブな結果を報告している一方、他の多くの実験が否 定的な結果を報告しており(図 8.16)、この信号変化の解釈を巡って議論が続いている。

axion 探索では、axion と光子/電子/核子との結合を利用する。axion の質量 m_a は宇宙論・天体物 理での議論によっておおよそ 10⁻⁶ eV $\leq m_a \leq 10^{-2}$ eV の領域に制限され、DM が axion 単独で構成 されているとすると、その質量は 10⁻⁵ eV 近傍であると考えられている(最近の議論については後 述)。一方、axion が暗黒物質であるという仮定をおかずに、実験室で axion を生成・検出する実験や、 太陽で生成された axion を観測する実験も行われているが、ここでは立ち入らない。現在最も感度が 高いと考えられているのは、axion と光子との結合を利用するもので、DM axion を強磁場中でプリ マコフ効果によって光子に転換し、これを検出する手法である。axion 質量として、 $m_a \sim 10^{-5}$ eV とすると、転換光子は数 GHz のマイクロ波に相当する。後述の ADMX 実験では $\sim 10^{-6}$ eV の比較 的軽い質量領域の探索をしており、これは転換マイクロ波周波数にして数百 MHz 程度に相当する。 具体的には、DM axion を強磁場(~ 10 T)中に設置されたマイクロ波共振空洞中で、パワーにして 典型的に 10⁻²² W のマイクロ波に転換し何らかの方法で検出するもの(axion haloscope)である。 axion 由来信号の検証には、信号強度の磁場依存性(~ B^2)を使用する。主たる雑音源は、共振空 洞内壁からの黒体輻射光子と検出器(増幅器)雑音である。前者は検出器システムを希釈冷凍機など を用いて ~ 10 mK まで冷却することによって低減が可能であるので、技術開発の焦点は増幅器など のマイクロ波検出系に起因するノイズの低減である。また、axionの質量は未知であるため、探索質 量に合わせて共振空洞の共振周波数を変化させる必要があり、この調整機構が要求される。WIMPs 探索と同様、得られた結果から axion と光子との結合定数の上限値を axion 質量の関数として求めて いる。米国の ADMX 実験が、単一の共振空洞を希釈冷凍機を使用して極低温まで冷却し、かつ後述 する標準量子限界に迫る増幅器(SQUID アンプ等)を使用した測定を行い、世界最高感度の結果を 報告している [84]。すなわち、標準的な銀河ハロー axion を仮定したとき、探索した質量領域におい て KSVZ 及び DFSZ axion モデルを排除した。また *m_a* ~ 24 eV 付近では、HAYSTAC グループが 小型の共振空洞と希釈冷凍機を用いて KSVZ モデルに迫る結果を報告している [83]。

8.6.2 最近の進展

WIMPs 探索では、世界的には二つの大きな流れがある。一つは大質量・高統計によって、より小さ い断面積の領域への探索(図 8.16 で下向きの探索)を進めるものであり、当面の目標として「ニュー トリノフロア」(図8.16参照)と呼ばれる太陽ニュートリノや大気ニュートリノとの原子核散乱が主 たる雑音源となる領域までの到達を目指している。もう一つは年周変化測定の結果から注目を集める ようになった、より軽い質量領域への探索(図 8.16 で左下向きの探索)を、検出器のエネルギー閾 値を下げることにより進めるものである。二つの流れはともに低雑音化が重要な技術的課題である が、最近の進展には目を見張るものがある。本研究分野でのエネルギースペクトル計数率の単位とし て dru (= counts/keV/kg/day) がしばしば用いられるが、主たる実験は放射性雑音スペクトル(電 子換算エネルギーで数 keV 程度の領域)で ~ 10⁻³ dru のレベルにあり、2 相型のキセノン検出器で は、~ 10⁻⁴ druを達成している。国内では、大質量の液体キセノンをシンチレータとして利用し、 キセノンの純化や自己遮蔽効果によって低雑音化を図る XMASS 実験が岐阜県神岡地下実験室で稼働 していたが、様々な結果を報告して測定を終了した。現在は得られた測定データの更なる解析を進め ており、今後も順次結果が報告されることが期待される。一方、世界ではより低雑音化が可能な2相 型(液相・気相でシンチレーション・電離両信号を用いることにより、粒子弁別を可能にする)の希 ガス検出器を採用するところも多い。当初2相型は大型化が難しいと考えられていたが、その後の実 験技術の進展に伴い現在では1トンクラスを達成しており、前述のように最高感度の測定結果を報告 している。この先「ニュートリノフロア」を目指すにあたってはより大型でより低雑音化可能な検出 器が必要となり、予算やマンパワーの観点からも比較的少数のプロジェクトに集約されていくことが 考えられる。XMASS グループはこの展望を持つことで、将来へ向けた新たな検出器開発を進めると ともに、グループの一部は2相型検出器を利用する次世代実験(海外での国際共同研究 XENONnT 実験)に参加し研究を開始した。

一方で、軽い WIMPs 探索については、多くのグループが様々なアイディアをもとにプロジェクト を進めている。国内では早稲田大学の ANKOK グループが、比較的軽い WIMPs に感度を持つアル ゴンの2相型検出器の R&D を進めている。また、DAMA/LIBRA の主張に対する議論に決着をつけ るべく、同じ大質量 NaI シンチレータによる測定を目指して、徳島大学で PICO-LON 実験の R&D が行なわれている。測定の鍵となる、NaI シンチレータの低放射性不純物化については目標を達成し たことが報告されている。なお、海外では COSINE グループが NaI シンチレータを用いて(年周変 化ではない方法で)DAMA/LIBRA グループの結果を否定する報告を行っている [86]。

信号の年周変化測定が議論を呼ぶ中で、WIMPs 由来信号の証拠を確実にすべく方向感度を持つ検

出器の開発が重要になってきている。また将来的に「ニュートリノフロア」を超える感度での測定が 必要になった場合、有望な検出技術の一つでもある。国内では、気体のフッ素化合物を標的原子核と し、反跳原子核の飛跡をガス検出器中で記録可能な NEWAGE 実験が、神戸大学を中心に神岡実験 室内で R&D を進めており、比較的小型の装置を用いて、方向感度型検出器としては世界最高感度の 結果を報告している。また名古屋大学は原子核乾板の技術を応用し、ナノスケールでの飛跡検出を可 能にしたダークマター探索実験 NEWSdm を、イタリアのグループと共同でグラン=サッソ地下実験 室にて進めている。他にも方向感度を持つ結晶シンチレータの開発などが行われている。

Axion haloscope 実験では、前述のように検出器起因の雑音低減が鍵となるが、通常のアンテナと 増幅器による検出では標準量子限界が存在する。この限界を超えるには、マイクロ波の単光子検出を 行う必要がある。国内では、Rydberg 原子をマイクロ波単光子検出器として利用する CARRACK 実 験が阪大・福井大・東北大・京大などで R&D を進めている他、いくつかの単光子検出器を用いた実験 が提案されている。また最近の宇宙観測などの結果から、axion 質量は従来考えられていたよりも重 い(m_a~10⁻⁴ eV)という予想も出てきている。これは転換光子の周波数が高くなることを意味す るが、一般的に空洞の典型的なサイズと共振周波数は逆比例の関係にある。一方、検出感度は空洞の 体積と形状因子(空洞中の電場と外部磁場の内積を空洞全体で積分した値。高次のモードを利用する と空間的にキャンセルされてこの値が小さくなってしまう)の積に比例するため、この値を妥当な領 域に保ったまま高い共振周波数を実現する工夫が必要になる。ADMX グループでは、将来計画とし て、現有の超伝導電磁石のボーア内に設置可能な複数の結合された小型共振空洞を利用する R&D を 進めている。他にも韓国の CAPP グループなどいくつかのグループが R&D を進めているが、国内で は東北大のグループがフォトニック結晶技術を用いた共振空洞の R&D を行っている。さらに空洞を 使わずに、開放型のファブリ=ペロー共振器と空間的に変動する磁場を用いるグループ (ORPHEUS) や、強磁場中に誘電体(ε~24)ディスクを複数(~80)設置することによる干渉効果を利用するグ ループ (MADMAX) なども R&D を進めている。岡山大学では、原子のマクロ=コヒーレンス効果に よる増幅を利用する TRACA 実験の R&D が進められている。東大では、レーザー干渉計を利用し た axion 探索実験を進めるとともに、重力波干渉計を利用した axion 探索実験の提案も行っている。

Haloscope 以外の探索実験の例として、近年になって、ジョゼフソン接合素子の物質特性が axion 場の影響により変化する可能性が指摘された。この研究は axion の運動方程式とジョゼフソン接合の 状態方程式の類似性に着目したものであるが、この理論により文献 [85] にみられる SNS 素子のコン ダクタンス中のピーク構造を解釈したところ、axion 質量は 0.11 meV とされた。実験の再現性、理 論解釈について現在議論がなされており、東北大、理研、デルフト工科大学、KEK、また名古屋大 のグループによって、検証実験が計画されている。

8.6.3 今後の展望

将来計画について述べる。WIMPs 探索実験においては、理論モデルから予想される WIMPs-核子 間の結合の強さに応じた感度を持つ実験を行うことにより、発見ないしはモデルの排除を進めていく ことになる。実験技術面での当面の目標としては、感度を前述の「ニュートリノフロア」へ到達させ ることである。一方で、DAMA/LIBRA の年周変化結果に基づく主張を検証するために、同一種類 の大質量シンチレータ(NaI)を用いた年周変化による検証実験も必要である。発見能力としては、 大型装置による年周変化の観測が優れており、現時点での世界の主流は希ガス、特にキセノンの気液 2 相型検出器の大型化となっている。また比較的軽い質量領域の探索手段として、超伝導技術などを 用いた低閾値化された検出器の開発も進んでいる。DM 由来(と思われる)信号の発見後に、そのさ らなる検証や性質を調べるにあたっては方向感度を持つ検出器による観測も不可欠である。また年周 変化による探索で「ニュートリノフロア」に至るまで発見がなかった場合、信号の方向情報はニュー トリノ BG との有力な識別情報となりうることが期待される。

axion 探索実験においては、理論モデル2つ(DFSZ モデルと KSVZ モデル)を用いて感度の指標 として使用することが多い。ADMX 実験はその中で結合の強い KSVZ モデルを(ある質量領域で) すでに排除し、(より高感度実験が必要な) DFSZ モデルを検証するに十分な感度の実験を進行してお り、既にいくつかの質量領域で結果も報告している。axionの質量は理論的にはフリーパラメータであ り、前述のように4桁($10^{-6} < m_a < 10^{-2}$ eV)にわたる広い領域に可能性が残っており、さらに宇 宙論のモデルによってはより軽い $(m_{\rm a} \le 10^{-6} \text{ eV})$ axion の存在を許すものもある。現在および近い 将来における探索実験の主たるターゲットが、axion が冷たい DM となりうる $10^{-6} < m_{\rm a} < 10^{-4} \ {
m eV}$ 程度の領域にあることは間違いなく、先述した高感度化の取り組みが今後も続けられていくことが期 待される。またより軽い (ma < 10⁻⁶ eV) axion の探索を目指す実験(ABRACADABRA, CASPEr, レーザー干渉実験等)の計画も進んでいる。さらに比較的重い質量領域(~ 10⁻⁴ eV、転換光子では 数 ~ 数十 GHz)に関しては、黒体輻射光子の低減がメリットである一方、共振空洞の小型化による 検出感度の低下や標準量子限界が高く検出器起因雑音が(原理的に)大きいなどのデメリットが指摘 されている。これらについては、大体積で高い共振周波数をもつ共振空洞(開放型共振器なども含 む)の開発や、レーザーや超伝導技術などを用いた様々な単光子検出法の提案がなされており、これ らに基づいた R&D を進めていく。このように DM axion 探索においては、広大な未開の質量領域が 残っており、世界中で様々なアイディアを武器に axion hunting の提案・計画・開発が進められてい る [87]。

最後に、実験環境について述べる。WIMPs 探索実験においては宇宙線や環境放射線が測定の BG となる。それ故、実験装置は、宇宙線や宇宙線由来の放射能の影響を避けるべく地下実験室内に設置 し、環境放射線に対する遮蔽(鉛・銅・水など)を備える必要がある。地下実験室の現状については、 二重ベータ崩壊の物理の項で議論した。axion 探索実験に関しては、現状の測定感度では特殊な実験 環境は必要としていない(強いて言えば、比較的広い実験室とマグネット・レーザー等の運転が可能 な電源などの環境、低温寒剤の入手が容易といった点が挙げられる)。しかし、探索質量領域や実験 装置のサイズ・材質によっては、宇宙線等のエネルギー付与による温度上昇に伴う黒体輻射光子の増 加が問題になる可能性がある。この場合は適切な遮蔽材の使用や、WIMPs 探索と同様の地下実験室 の利用を考慮に入れる必要が出てくる。

繰り返しになるが、DM が存在すること自体はほぼ間違いないが、その正体は依然として謎である。それが、WIMPs なのか、axion なのか、それとも全く別の粒子なのか、それを明らかにすることは急務である。

8.7 他 WG、他分野との連携

基礎物理実験は最先端の核物理的手法を最大限利用する。大強度ビーム源、高精度ビーム制御、標 的原子核の偏極、高性能検出器など、いずれも原子核実験の他の分野でも重要な開発要素である。基 礎物理実験と他の核物理実験とはお互いに実験技術を高めあう関係にある。不安定原子核を用いるこ とで効果が増倍する系を探したり、核子構造や反応行列の理解によって基礎物理実験から基本的パラ メータを導く際の不定性を低減させたりすることができるだろう。また「標準理論を超える物理」の 効果が実験的にどのように現れるか、どの精度で測定すべきか、各実験の対応関係を理論的に考察提 案検証するのには、理論グループのサポートが欠かせない。一方、基礎物理分野で開発・発展したイ オントラップや光ポンピングといった手法は、不安定核や偏極ターゲットに応用され、中性子過剰核 や精密核物理の研究に利用されている。他のグループと相互に協力して研究を進めていくことが期待 される。

核物理以外の分野で関連が深いのは高エネルギー物理分野である。現在LHCにおいて標準理論を 超える物理に現れる粒子の質量スペクトルの直接探索が行われている。標準理論を超える物理の質 量パラメータの決定あるいは制限を与えることが期待されている。一方 EDM 探索実験は標準理論を 超える物理の CP 位相のパラメータを観測しようとするものである。質量と CP 位相は互いに独立な パラメータであり、両実験は標準理論を超える物理の理解のためには相補的である。また、ニュート リノのマヨラナ性の検証は加速器実験では感度がなく、原子核物理による実験が唯一の方法である。 これまで見てきたように原子核物理による基礎物理実験は標準理論を超える物理の探索・研究にとっ て強力な手段になる。高エネルギー加速器実験の結果、さらに理論のサポートにより、標準理論を超 える物理の総合的な理解が得られることが期待される。



図 8.17: 他の Working Group との関連

8.8 まとめ

原子核物理における基礎物理は、今日までに蓄積された最先端の核物理的手法を高度に統合し、「素 粒子標準理論を超える物理とは何か?」という21世紀物理学最大のテーマに挑むものである。実験技 術や理論面で核物理の他の分野、さらには高エネルギー物理や宇宙物理分野の研究者とも連携して、 強力に推進して行くべきである。



図 8.18: 各実験のタイムライン

	衣 8.1: 谷夫駅の旭設・丁昇・八貝				
	施設		予算	人員	
E D M	UCN 源建設(TRIUMF)、EDM 測定系開発 磁束計高度化、磁気トラップ増加 CYRIC 高強度化、ビームライン建設		数億円 年間数千万円 数億円	コンスタン トな人員確 保	
μ	μビームライン建設(J-PARC)		ン建設(J-PARC) 50 億円		
$egin{array}{c} 0 \\ u \\ D \\ B \\ D \end{array}$	地下大実験室(DM と共通) ^{nat} CaF ₂ シンチレータ検出器 同位体 ⁴⁸ Ca 濃縮工場		100 億円 10 億円 数十億円	20~30人	
D M	WIMPs axion	10 億円 数億円 10 億円 2 億円 2 億円	(大規模実験) (R&D) (holoscope) (helioscope) (laser R&D)	20~30人 計 15人	

表 8.1: 各実験の施設・予算・人員

粒子	手法	上限值 [e·cm]	手法	目標感度 [e·cm]
中性子	超冷中性子蓄積	3.0×10^{-26}	高密度超冷中性子蓄積	$10^{-27} \sim 10^{-28}$
原子核	Hg 原子セル	7.4×10^{-30}	Xe 原子セル/ 不安定原子核ビーム	10^{-30}
電子 (原子)	Tl 原子ビーム	1.6×10^{-27}	Cs 原子トラップ, Fr 原子トラップ	10^{-30}
電子 (分子)	ThO 分子ビーム	8.7×10^{-29}	YbF 分子ビーム, HfF イオントラップなど	10^{-30}
μ	磁気蓄積リング	$1.9 imes 10^{-19}$	高精度磁気蓄積	10^{-22}
τ	$e^+e^- \to \tau^+\tau^-\gamma$	3.1×10^{-16}	高精度	10^{-20}
陽子/ 重陽子	Tl スピン共鳴	$(p) 5.4 \times 10^{-24}$	蓄積リング	$(d) \ 10^{-29}$

標的核	実験名	質量 (kg)	手法	場所	状態
⁴⁸ Ca	CANDLES III	0.35	Scint. Crys.	Kamioka	稼働
⁷⁶ Ge	GERDA I/II	15/35	Ionization	LNGS	稼働
	Majorana	30	Ionization	SUSEL	建設中
⁸² Se	SuperNEMO	100	Track./Calo.	LSM	R&D
	Lucifer		Bolom.+Scint.	(未定)	R&D
¹⁰⁰ Mo	MOON	30	Track./Calo.	(未定)	R&D
	AMORE	30	Track./Calo.	(未定)	R&D
¹¹⁶ Cd	COBRA		Ionization	LNGS	R&D
¹³⁰ Te	CUORE	200	Bolometer	LNGS	稼働
¹³⁶ Xe	KamLAND-Zen	$400 \rightarrow 750$	Liquid Scint.	Kamioka	稼働
	EXO200	200	Liquid TPC	WIPP	稼働
	NEXT	100	Gas TPC	LSC	R&D
¹⁵⁰ Nd	DCBA/MTD	32	Tracking	(未定)	R&D
	SNO+	44	Liquid Scint.	SNOlab	建設中

表 8.3: 各種 0vDBD 実験の一覧

表 8.4: 各種 DM(WIMPs)探索実験の一覧

場所	地下実験室	計画名
日本	Kamioka	XMASS, NEWAGE
		PICO-LON
韓国	Yangyang	KIMS, TEXONO
中国	CJPL	CDEX
France	LSM	EDELWEISS, EURECA
	LSBB	SIMPLE
Italy	LNGS	DAMA/LIBRA, XENON100, CRESST, WARP
Spain	LSC	ANAIS, ROSEBUD, ArDM
UK	Boulby	ZEPLIN III, DRIFT II
USA	Soudan	CDMS, CoGENT
	SUSEL	LUX, LZ
Canada	SNOlab	DEAP, miniCLEAN, PICASSO, COUPP,
		DarkSide, SuperCDMS

参考文献

- [1] A. Kostelecky, and A. Vargas, Phys. Rev. D 92, 056002 (2015).
- [2] E.J. Salumbides, W. Ubachs, and V.I. Korobov, J. Mol. Spect. 300, 65 (2014).
- [3] J. Murata, S. Tanaka, Classical and Quantum Gravity 32, 033001 (2015).
- [4] M.S. Safronova et al., Rev. Mod. Phys. 90, 025008 (2018).
- [5] F. Ficek et al., Phys. Rev. Lett. 120, 183002 (2018).
- [6] M. Hori et al., Nature 475, 484 (2011).
- [7] M. Hori et al., Science 354, 610 (2016).
- [8] M. Hori et al., Nature 581, 37 (2020).
- [9] M. Ahmadi et al., Nature 548, 66 (2017).
- [10] M. Ahmadi et al., Nature 557, 71 (2018).
- [11] M. Ahmadi et al., Nature 578, 375 (2020).
- [12] N. Kuroda et al., Nat. Comm. 5, 3089 (2014).
- [13] C. Smorra et al., Nature 550, 371 (2017).
- [14] S. Ulmer et al., Nature 524, 196 (2015).
- [15] V. Chohan et al., CERN-2014/002 (2014).
- [16] J. Biesheuvel et al., Nat. Comm. 7, 10385 (2016).
- [17] S. Alighanbari et al., Nature 581, 152 (2020).
- [18] J.S.M.Ginges, V.V.Flambaum, Phys. Rep. 397, 63 (2004).
- [19] N. Yamanaka, B. K. Sahoo, N. Yoshinaga, T. Sato, K. Asahi, and B. P. Das, Eur. Phys. J. A 53, 54 (2017).
- [20] Nathal Severijns, Marcus Beck, and Oscar Naviliat-Cuncic, Rev. Mod. Phys. 78, 991 (2006).
- [21] K. K. Vos et al., Rev. Mod. Phys. 87, 1483 (2015).
- [22] N. Yamanaka et al., J. High Energy Phys. 2014, 12, 110 (2014).
- [23] J. M. Pendlebury et al., Phys. Rev. D. 92, 092003 (2015).
- [24] http://ucn.web.psi.ch/
- [25] Y. Masuda et. al, Phys. Rev. Lett. 108, (2012) 134801

- [26] S. Ahmed et. al, Phys. Rev. C. 99, 25503 (2019)
- [27] http://p25ext.lanl.gov/edm/edm.html
- [28] Measurement of Neutron Electric Dipole Moment, P33 proposal submitted to J-PARC (2009). http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_1001/pdf/KEK_J-PARC-PAC2009-11.pdf
- [29] B. Garner et al., Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 161601.
- [30] M. A. Rossenberry et al., Phys. Rev. Lett. 86, 22 (2001).
- [31] N. Sachdeva et al., Phys. Rev. Lett. 123, 143003 (2019).
- [32] T. Inoue et al., Eur. Phys. J. D. 70 (2016) 129.
- [33] T. Sato et al., Phys. Lett. A 382 (2018) 588.
- [34] S. A. Murthy, Phys. Rev. Lett. 63, 965 (1989).
- [35] B. C. Regan et al., Phys. Rev. Lett. 88, 071805 (2002).
- [36] J.J. Hudson et. al., Nature 473 (2011) 493.
- [37] The ACME Collaboration, Science 343, 269 (2014).
- [38] K. Zhu et al., Phys. Rev. Lett. 111, 243006 (2013) & K. Zhu, Ph.D. dissertation, Penn State University, 2013.
- [39] B. J. Wundt et al., Phys. Rev. X 2, 041009 (2012).
- [40] C. Chin et al., Phys. Rev. A 63, 033401 (2001).
- [41] L. I. Schiff, Phys. Rev. 132, 2194 (1963).
- [42] V. F. Dmitriev, R. A. Sen'kov and N. Auerbach, Phys. Rev. C 71, 035501 (2005).
- [43] J. Dobaczewski and J. Engel, Phys. Rev. Lett. 94, 232502 (2005).
- [44] E. Teruya, N. Yoshinaga, K. Higashiyama and K. Asahi, to be published in Phys. Rev. C.
- [45] T. M. R. Byrnes, V. A. Dzuba, V. V. Flambaum, and D. W. Murray, Phys. Rev. A 59, 3082 (1999).
- [46] D. Mukherjee, B. K. Sahoo, H. S. Nataraj and B. P. Das, J. Phys. Chem. A 113, 12549 (2009).
- [47] T. Bhattacharya, V. Cirigliano, R. Gupta, H.-W. Lin and B. Yoon, Phys. Rev. Lett. 115, 212002 (2015).
- [48] BMW Collaboration, preliminary (2017).
- [49] J. A. Behr and G. Gwinner, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 36, 033101 (2009).

- [50] A. Kozela et al., Phys. Rev. C 85, 045501 (2012).
- [51] R. Huber et al., Phys. Rev. Lett. 90, 202301 (2003).
- [52] G.E.Mitchell et al., Phys. Rep. 354, 157 (2001).
- [53] V.P.Gudkov, Phys. Rep. 212, 77 (1992).
- [54] R.H. Parker et al., Phys. Rev. Lett. 114 (2015) 233002.
- [55] V. Anastassopoulos et al., Proposal to DOE, Oct. 2011.
- [56] N. Yamanaka and E. Hiyama, Phys. Rev. C 91 (2015) 054005.
- [57] K. Harada et al., Appl. Opt. 55, 1164 (2016).
- [58] H. Kawamura et al., Rev. Sci. Instrum. 87, 02B921 (2016).
- [59] T. Inoue et al., Hyperfine Interact 231, 157 (2015).
- [60] V. Coppolaro et al., J. Chem. Phys. 141, 134201 (2014).
- [61] J. Zhang et al., Phys. Rev. Lett. 115, 042501 (2015).
- [62] T. Aoki et al., Asian J. Phys. 25, 1247 (2016).
- [63] T. Aoki et al., Appl. Phys. B 123, 120 (2017).
- [64] T. Aoki et al., Phys. Rev. A 87, 063426 (2013).
- [65] J. de Vries and Ulf-G. Meißner, Int. J. Mod. Phys. E 25, 1641008 (2016).
- [66] H. Kawamura et al., Mod. Phys. Lett. A 32, 1750058 (2017).
- [67] J. Murata et al., Hyperfine Interact 237, 125 (2016).
- [68] T. Aoyama et al. [Muon g-2 Theory Initiative], arXiv:2006.04822 [hep-ph]
- [69] BNL E821 experiment, Phys. Rev. D 73, 072003 (2006).
- [70] 三部 勉,「J-PARC におけるミューオン g-2・EDM の精密測定」原子核研究 第 61 巻 2 号 pp 99-111, 2017 年 3 月発行.
- [71] J. Grange et al., arXiv:1501.06858 [physics.ins-det].
- [72] M. Abe et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 053C02 (2019).
- [73] A. Gando et al., Phys. Rev. Lett. 117, 082503 (2016).
- [74] F. T. Avignone III, S.R. Elliott and J. Engel, Rev. Mod. Phys. 80, 481 (2008).
- [75] Super-Kamiokande collaboration, Phys. Rev. Lett 90, 061101 (2003).

- [76] T. Yanagida, in Proc. Workshop on Grand Unified Theory and Baryon Number in Universe p.95 (1979).
- [77] W. Buchmüller and T. Yanagida, Phys. Lett. B 445 p399 (1997).
- [78] T. Kishimoto et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 2015 (3): 033D03.
- [79] J.E. Kim, Phys. Rev. Lett. 43, 103 (1979); M.A. Shifman, A.I. Vainstein, and V.I. Zakharov, Nucl. Phys. B166, 493 (1980).
- [80] A.R. Zhitnitsky, Soy. J. Nucl. Phys. 31, 260 (1980); M. Dine and W. Fischler, Phys. Lett. 120B, 137 (1983).
- [81] N. Aghanim et al. (Planck Collaboration), https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833880.
- [82] M. Tanabashiet al.(Particle Data Group), Phys. Rev. D98, 030001 (2018) and 2019 update.
- [83] B. M. Brubaker et al., Phys. Rev. Lett. 118(2017)061302.
- [84] T. Braine et al.(ADMX Collaboration), Phys. Rev. Lett. 124, 101303 (2020).
- [85] C. Hoffmann et al., Phys. Rev. B 70, 180503(R) (2004).
- [86] G. Adhikari et al. (COSINE-100 Collaboration), Nature 564, 83 (2018).
- [87] I.G. Irastorza, J. Redondo, Prog. Part. Nucl. Phys. 102 (2018) 89.
- [88] K. Mishima et al., Nucl. Instr. and Meth. A 600, 342 (2009).