

## 2.7 核物理的手法による基礎物理

### Fundamental Physics

北口雅暁	KITAGUCHI Masaaki	代表、京都大学・原子炉実験所
小川泉	OGAWA Izumi	副代表、福井大学・理学研究科
堀正樹	HORI Masaki	Max Planck Institute
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	大阪大学・理学研究科
吉見彰洋	YOSHIMI Akihiro	岡山大学・極限量子研究コア
岸本忠史	KISHIMOTO Tadafumi	世話人、大阪大学・核物理研究センター

## 2.7.1 序

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、という問いに答えようと発展してきた。20 世紀物理学の一つの完成形「素粒子標準理論」は Weinberg-Salam 理論と量子色力学の組み合わせによって様々な素粒子反応を説明することに成功した。しかし現在において「標準理論」は、基本的な 4 つの相互作用のエネルギーが大きく異なり統一されていないこと、基本的対称性の破れの起源を説明しないこと、また多くのパラメータを必要とするなど、満足いく理論ではないと考えられるようになった。更にニュートリノに質量があることがわかるなど、標準理論を破る実験結果も報告されている。「素粒子標準理論を超える物理とは何か？」は 21 世紀物理学の最も重要な課題の一つである。

宇宙論的にも、現在の物質優勢の宇宙はいかにして形成・進化してきたか、という疑問に対して、基本的対称性の破れやダークマターの理解が与える影響は大きい。つまりここで言う基礎物理研究の成果は、核物理のみならず素粒子物理、宇宙物理に対して極めて大きなインパクトを持ちうる。ひいては素粒子標準理論を超える物理として提唱されている超対称性理論や余剰次元モデルなどの検証に大きな影響を与える。

そしてこの基礎物理を研究するのに原子核物理は強力な手段である。中でも

1. CPT 対称性はどこまで厳密に保たれているのか？
2. CP の破れの起源は何か？基本相互作用の時間反転対称性は破れているのか？
3. レプトンフレーバーは破れているのか？大きな荷電レプトン混合は存在するのか？
4. 粒子数は破れているのか？ニュートリノはマヨラナ粒子か？その質量は？
5. 暗黒物質 (Dark Matter; DM) の正体は何か？

といったテーマは核物理的手法が発展に大きく貢献しうる (図 2.7.1)。巨大加速器を用いて高エネルギー反応を直接観測する「高エネルギーフロンティア」に対し、核物理的手法による基礎物理実験は対称性の破れや高次ループで現れる微小な効果を高統計実験や精密測定によって調べる「インテンシティ・精密測定フロンティア」にあたる。高エネルギーフロンティアが巨大化・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。例えば、強い相互作用

(QCD) における CP の破れが不自然なまでに小さい事が知られており (Strong CP 問題)、これは様々な超対称性模型に厳しい制限を与えている。これは過去 60 年間、小規模な実験が中性子 EDM を  $3 \times 10^{-26} e \text{ cm}$  にも及ぶ感度で探索した結果、解明された事実である。この問題を解決する一つの理論的シナリオとして Peccei-Quinn 機構が提唱されており、その自発的対称性の破れによって現れる

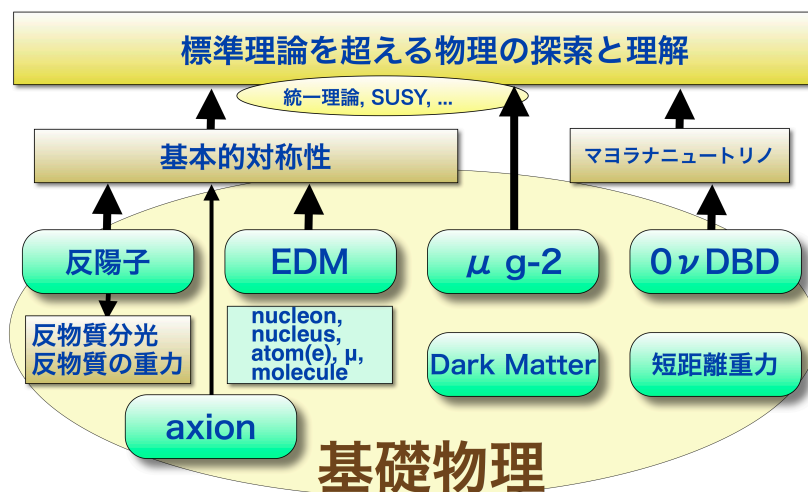


図 2.7.1 : 基礎物理の目標と、それに至る各種実験

axion 粒子は、暗黒物質の候補の一つにもなっているなど、多くの物理に関係している。

現在日本のグループは、(1)反陽子の精密分光による CPT 対称性検証実験、(2)各種粒子の EDM 測定による時間反転対称性検証・標準理論を超える物理の探索、(3)ミューオン異常磁気能率・ミューオンウム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、(4)ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 ( $0\nu\text{DBD}$ ) 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、(5)DM 探索実験、などを主導して推進している。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 2.7.2)。

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。この章では前述した 5 つの実験テーマに分けて、その現状と展望をそれぞれまとめる。

## 2.7.2 反陽子の精密分光による CPT 対称性検証実験

### 2.7.2.1 概要

低速反陽子分野の主要な研究テーマは、1. 反水素原子のレーザーまたはマイクロ波高精度分光、2. 反水素原子の重力加速度の測定、3. 反陽子ヘリウム原子（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）の高精度レーザー分光である。これらは、物質と反物質の質量、電荷、あるいは磁気モーメントを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持っている。これらの実験によって標準理論を超えるような現象が発見されれば、反陽子はそのプローブとしてより重要性を増す。また、QED の三体問題についての新たな知見、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幅広いテーマを持っている。

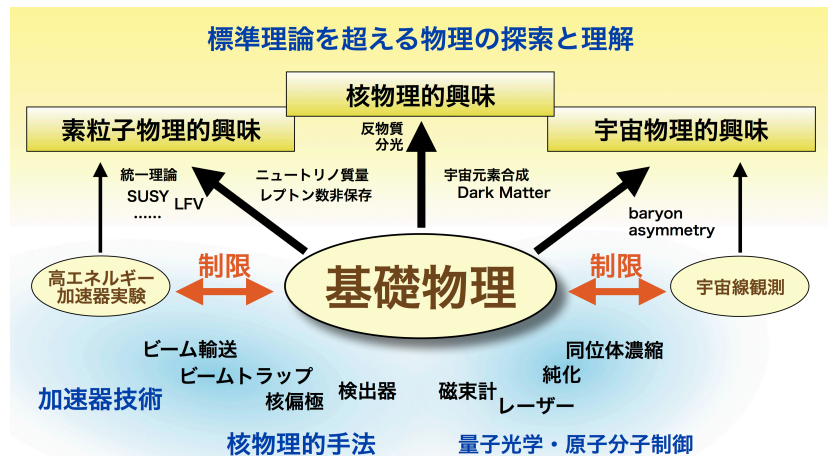


図 2.7.2：基礎物理における核物理の役割

## 2.7.2.2 現状

反陽子の実験は技術的には様々な困難があり、その捕獲や冷却について 25 年の間基礎的な実験が繰り返されている。近年のレーザー技術の進歩を応用することによって、反陽子を含む原子の遷移エネルギーを 10 桁以上の精度で測定することが可能になった。さらに高精度のレーザー分光を実現するために開発・研究が続けられている。

反陽子の実験は、欧州合同原子核研究機構(CERN)の反陽子減速器 Antiproton Decelerator (AD) で行われている。AD は毎分  $3 \times 10^7$  個の反陽子で運動エネルギーが 5MeV のビームを供給しているが、現在 4 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。

1997 年に発足した ASACUSA 実験は、日本グループを中心として、デンマーク、イギリス、イタリア、オーストリア、ハンガリー、ドイツの研究者が 40 人ほど参加する国際コラボレーションである。日本の原子核分野の研究者による実験成果としては、反陽子ヘリウムのサブドブラー二光子レーザー分光測定によって、反陽子と電子の質量比を  $1.4 \times 10^{-9}$  の精度で決定した[1]。陽子と電子の質量比は、自然界で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、12 桁程度まで実験精度を改善できる可能性がある。反水素原子については、究極的には  $1s2s$  二光子遷移を 14 桁以上の精度で測定することが可能である。また、カスプトラップや超伝導ポールトラップなどを用いて、 $1s$  状態の超微細構造をマイクロ波分光で測定する実験も計画されている[2]。さらに、世界に先駆けて反陽子を高い効率で減速する四重極子減速器 RFQD も CERN と共同開発した。同じ研究施設で推進されている ALPHA と ATRAP の両実験は最近、反水素原子を磁気トラップ中で 1000 秒以上捕獲することに成功した[3]。ALPHA はさらに反水素の超微細構造をマイクロ波分光法で  $3 \times 10^{-4}$  の精度で測定した。反水素原子をレーザー冷却して落下させて、反物質の重力加速度を測定する実験施設も建設されている。

## 2.7.2.3 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 100keV の大強度反陽子ビームを生成する計画が CERN の 2011-2016 中期計画として承認された。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 2.7.3)。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。ELENA の建設費のうちの一部は日本グループが負担するが、とくに引き出しビームラインとビーム検出器群の開発について中心的な役割を果たす予定である。反陽子業界に対する日本のコントリビューションは高く評価されており、次期プロジェクトにおける現地での発言権も強い(執

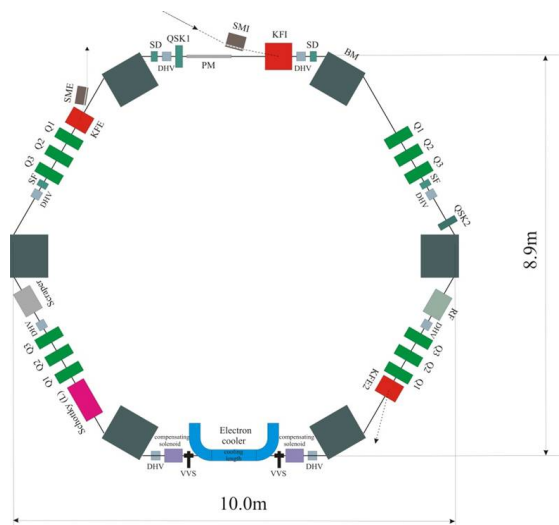


図 2.7.3 : ELENA 減速器の模式図



筆者の一人は、加速器開発のコアメンバー)。

ドイツでは、反陽子を用いた原子核物理で残された最大のテーマは、チャームを含む中間子のスペクトロスコピーであると考えられている。これは GSI FAIR の PANDA 実験で追求される予定である。GSI は低速反陽子施設に必要な減速リング群 (RSR, NESR, USR) を建設するかどうかという判断を第二期以降 (2020 年以降着工予定、財源は未定) まで大幅に延期したので、当分は反陽子を用いた実験は CERN の AD-ELENA で続ける予定である。

ASACUSA 実験は、国内の大学の研究者を中心に、年間合計数千万円~1 億円程度の科研費で運営してきた (装置の建設費、現地の消耗品代、2~3 人のポストクの給料、学生の滞在費込み)。今後も同程度の予算で実験を続けたいと考えているが、特にポストクの給料と次世代の研究者のポストの確保は重大な問題だとグループは認識している。このように外国の施設で行われる国際共同プロジェクトを競争資金に頼って推進する場合、日本国内の原子核、素粒子、原子物理、レーザーなどの幅広い分野の理解が不可欠である。引き続き原子核物理として強く推進することが重要である。

### 2.7.3 各種粒子の EDM 測定による時間反転対称性検証・標準理論を超える物理の探索

#### 2.7.3.1 概要

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。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る。CPT 定理を仮定すれば、CP が破れているので T も破れていなければならないが、様々な実験にもかかわらず EDM は未だ測定されていない。EDM の探索・測定は T の破れの機構、すなわち CP の破れの機構解明に重要な役割を持っている。また EDM の探索・測定は、現在の素粒子標準理論を超える物理の探索とその機構解明にとって強力なプローブとなる。標準理論では EDM は高次ループを経なければならないため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 対称性の破れに依存している [4]。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。

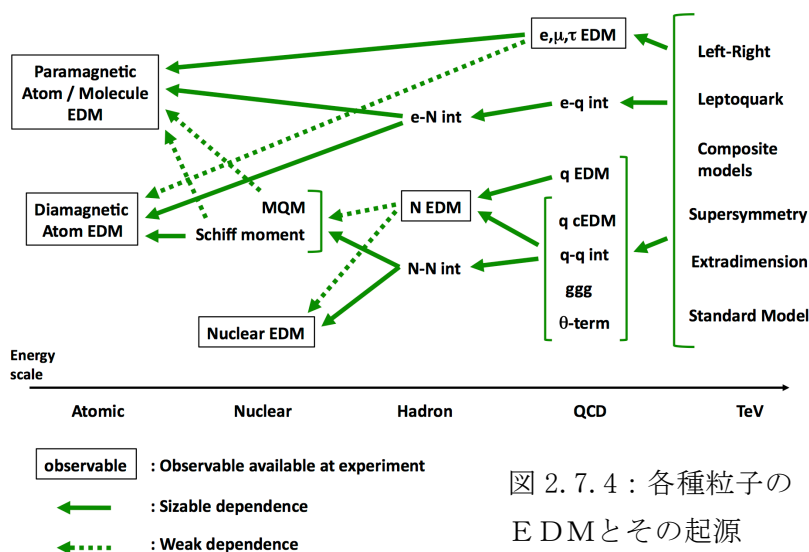


図 2.7.4: 各種粒子の EDM とその起源

レプトンにおける CP 対称性の破れは電子やミュオンの EDM の直接測定から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強磁性原子に分類することが出来、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、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依存性を持っている (図 2.7.4)。標準模型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ので、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**ことがわかる。日本国内に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。ここでは特に 1. 中性子 EDM と 2. 原子 EDM について述べる。上述したがレプトンセクターの CP の破れを直接測定するミュオン EDM はこれらと相補的な関係にあるが、次章で g-2 実験などとともに詳しく述べる。

### 2.7.3.2 現状

#### 2.7.3.2.1. 中性子 EDM

中性子の EDM は、フランス・ILL の原子炉中性子を用いた実験による  $2.9 \times 10^{-26} e \text{ cm}$  が現在の上限である [5]。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し、磁場によるスピン歳差回転の、電場の向きによる変化を測定する。現在の測定では、印可した磁場の不確かさが最も大きな系統誤差の要因になっている。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。磁場の一様性を高めるためその領域を小さくする。一方、容器を小さくすることで統計を減少させないためには、容器に蓄積する UCN の個数を保つ必要がある。つまり UCN の空間密度が重要であり、現状の 10UCN/cc から 1000UCN/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。

スイス・PSI 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、固体重水素の非弾性散乱によって UCN に変換する [6]。一方、阪大 RCNP と KEK のグループは超流動ヘリウムによる非弾性散乱を用いた高密度 UCN 源を計画している [7]。既に RCNP サイクロトロンの陽子ビームを用いて発生させた中性子を超流動ヘリウムを用いて UCN に変換し、容器に蓄積して歳差回転を観測することに成功している。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。同グループはカナダ・TRIUMF に前述の装置を建設しようと計画をしている。また原理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なくす [8]。一方 KEK、京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 測定を計画している。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。一般的

に 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 [9]。

系統誤差のもう一つの大きな要因である磁場の一様性・測定精度に関しては、原子 EDM 実験と共通しており、共同して高精度の磁束計の開発が進められている。

### 2.7.3.2.2. 原子 EDM

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、Princeton 大・Washington 大のグループの  $^{199}\text{Hg}$  を用いた実験による  $3.1 \times 10^{-29} \text{ e cm}$  が現在の上限である [10]。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ザー等によって解析する。中性子と違い安定なので長時間連続観測が可能であり、セル内に高密度の原子 ( $10^{14} \sim 10^{18} / \text{cm}^3$ ) を封入することができる。長時間観測の特徴を生かせる原子系としては核スピン  $1/2$  の  $^{129}\text{Xe}$  と  $^{199}\text{Hg}$  があり、これらは上記の比較的高い原子密度において数百秒以上のスピンコヒーレンス時間を達成できる。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。

Michigan 大学のグループは  $^{129}\text{Xe}$  の核スピンメーザー実験を行い、 $4.0 \times 10^{-27} \text{ e cm}$  の上限値を報告している [11]。また、Princeton 大のグループは高精度 EDM 探索に向けて、液体状態での偏極  $^{129}\text{Xe}$  のスピン歳差測定実験を現在行っている [12]。一方国内では磁場変動による系統誤差の抑制を目指し、東工大・理研のグループが  $^{129}\text{Xe}$  低周波核スピンメーザーの開発を行ってきた [13]。現在 45,000s 間の連続メーザー発振において、5 nHz のスピン歳差周波数決定精度を実現していて、これは  $^{129}\text{Xe}$  原子 EDM に対する感度としては  $5.0 \times 10^{-28} \text{ e cm}$  である (印可電場強度  $E=10 \text{ kV/cm}$  を仮定) (図 2.7.5)。未だどの系においても有限の値の EDM は測定にかかっているが、 $^{199}\text{Hg}$  の  $10^{-29} \text{ e cm}$  という極めて小さい上限値からは、単純な SUSY 模型における CP 非保存位相に既に厳しい制限を付けているという指摘がある。

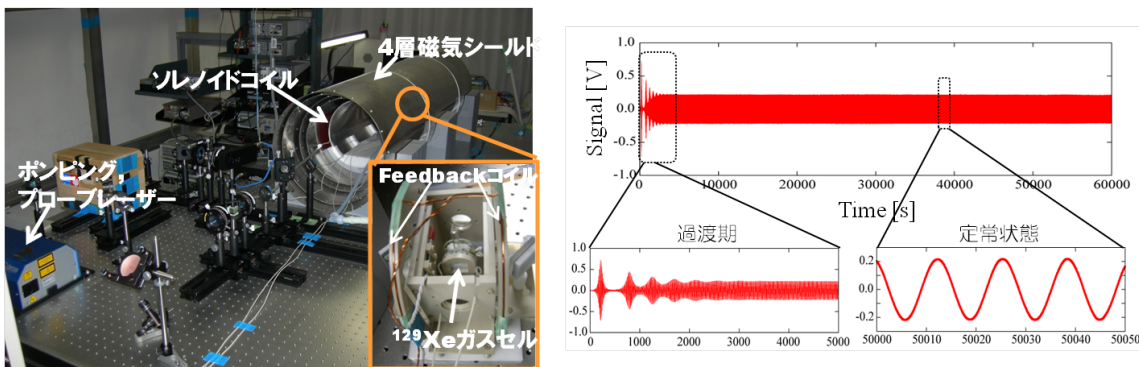


図 2.7.5: 左: 東工大グループで行われている  $^{129}\text{Xe}$  原子 EDM 探索を目指した核スピンメーザー装置。右: 観測されているスピンメーザー発振信号。

常磁性原子による電子 EDM 実験は、セル中に閉じ込めた Cs 等の安定原子や、Tl 等の原子線を用いて進められてきた[14]。しかし測定領域の電場・磁場の非一様性から EDM の探索精度は  $10^{-28} e \text{ cm}$  の限界を超えることは困難な状況となっている。標準模型を超える様々な理論の枠組みが予想する  $10^{-29} e \text{ cm}$  から標準模型が予想する  $\sim 10^{-40} e \text{ cm}$  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。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 Cs 原子を中心に米国、また国内では Fr 原子 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を中心に進められている（詳しくは後述）。また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。特に 2011 年に英国のグループによって発表された YbF 分子を用いた EDM 測定ではこれまでの電子 EDM の上限値を更新し ( $|d_e| < 10.5 \times 10^{-28} e \text{ cm}$ ) [15]、注目を集めている。

### 2.7.3.3 展望

#### 2.7.3.3.1. 中性子 EDM

上述したように、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、超流動ヘリウムを用いた UCN 源を 2015 年にカナダ・TRIUMF に設置する計画を進めている。TRIUMF の大強度ビームと、超流動ヘリウムによるロスのない UCN 変換により、高密度 UCN を達成する。UCN 変換部から取出しまでを超流動ヘリウムで満たすことで UCN のロスを抑える。そのため大きな系全体を安定して冷却させる必要があり、開発が続いている。国内では KEK と京大を中心としたグループが J-PARC LINAC 直下に専用 UCN 発生施設を建設する計画を J-PARC に正式に提案した (J-PARC PAC P33)。こちらは固体重水素による UCN 変換を用いる。J-PARC のパルス瞬間強度の強い陽子ビームから UCN を発生させ、ロスする前に固体重水素から取り出し、輸送する。輸送にはパルス状の中性子の速度を制御し、拡散する UCN を測定装置位置で空間的に再集束させる (図 2.7.6)。このような高性能中性子光学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 と設計が進められている。

中性子 EDM 実験は UCN 源が加速器に依存している以上、比較的大型にならざるを得ない。ビームラインの設計や大強度ビームを受け入れるターゲット、コンバーターの開発など、継続的な開発研究が必要である。またコン

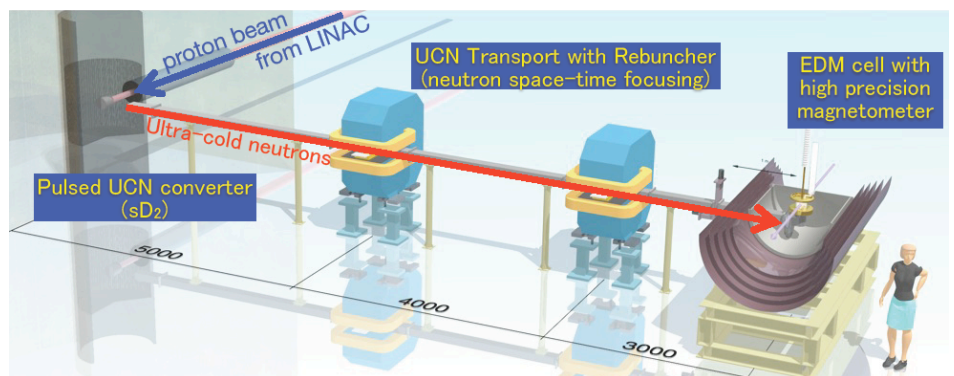


図 2.7.6 : J-PARC UCN 源と EDM 測定装置の配置



バーターの冷却系や中性子輸送系の表面、蓄積容器の表面の物性、高精度磁場測定など、物性物理を含む様々な領域の技術を組み合わせる必要がある。特に磁束計開発においては、後述する原子を用いた EDM 測定のグループとも連携して研究を進めることが重要である。10 年後までには新しい UCN 源とその他要素技術の組み合わせ・最適化が行われ、 $10^{-27}$ e cm の精度に到達するだろう。さらにその先  $10^{-28}$ e cm の精度に至るには、加速器の大強度化だけでなく、系統誤差のさらなる低減のために輸送や蓄積の際の中性子の挙動を高度に制御する必要になる。これら複合技術としての中性子研究組織を今後 20 年間にわたって育成・継続する必要があるだろう。

### 2.7.3.3.2. 原子 EDM

原子核内の P, T を破る効果を見ることができ反磁性原子の中で、精密測定が期待できる電子スピンのゼロで核スピンの  $1/2$  の系に限ると、これからは対象原子はまずは  $^{129}\text{Xe}$  と  $^{199}\text{Hg}$  であると思われる ( $^3\text{He}$  は reference 原子として用いられる)。単純なモデルでは Z の大きな  $^{199}\text{Hg}$  の方が大きな原子 EDM が期待できるが、現在でも核構造の違い等を反映したより信頼度の高い理論計算の研究が行われている。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。 $^{199}\text{Hg}$ 、 $^{129}\text{Xe}$  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。現状では多くの分離された 1 回数百秒程度の測定を積算した全データから、結果的に 0.1pG 以下の磁場変動に抑えている ( $^{199}\text{Hg}$  実験) と結論付けているが、今後は常に 0.1pG 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だと考えられる。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 測定セル内でオペレートする comagnetometer 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、 $10^{-30}$ e cm 台の EDM 測定感度の実現が期待できる。これによって有限の EDM の測定が現実的になり、たとえ上限値しか決まらないとしても、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模型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近代的な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、コンスタントな予算獲得は必要である。

一方、重い不安定元素では 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 ( $^{225}\text{Ra}$ )、カナダ・

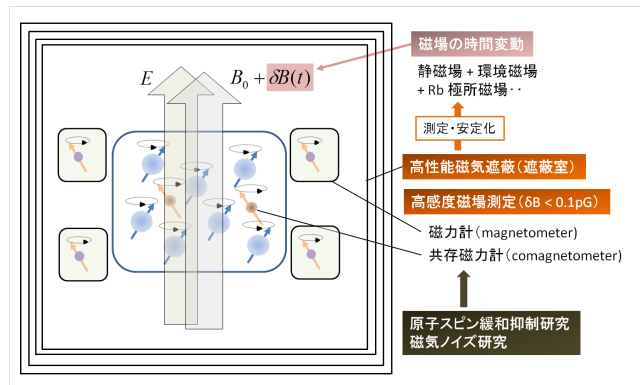


図 2.7.7: 反磁性原子 EDM 実験で今後必要になる要素。



TRIUMF ( $^{223}\text{Rn}$ ) にて計画されていて、最終的には  $10^{-28}$  e cm 台の原子 EDM 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  $^{225}\text{Ra}$  は核スピンの  $1/2$  で、寿命も 15 日と長いことから期待がもてる。またもうひとつの方向として、蓄積リングにおける荷電粒子系の EDM 測定も計画案が検討されており（アメリカ・BNL における陽子、重陽子 EDM 実験等）、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・系統誤差抑制のための R&D、および EDM 実験、が上記の色々な系について行われ、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が得られ始め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高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、原子量最大のアルカリ原子である放射性元素  $^{210}\text{Fr}$  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レーザー冷却不安定原子に対する EDM 探索を進めている。Fr は大強度重イオン源からの  $^{18}\text{O}$  ビームと  $^{197}\text{Au}$  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生成 Fr の冷却・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 Fr を生成・引き出すという特徴ある方法を確立し、カナダ・TRIUMF、イタリア・LNL 等の加速器施設と同程度の Fr 生成量  $\sim 10^6 \text{Fr}^+/\text{s}$  を実現している。さらに一次ビーム強度を増強することで、 $\sim 10^7 \text{Fr}^+/\text{s}$  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  $10^8 \sim 10^9 \text{Fr}^+/\text{s}$  には及ばないものの、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状況であり、CYRIC は専用ビームラインを備えた大強度 Fr 源を有する国際的な基礎物理研究拠点となり得る状況である。なお、TRIUMF、LNL では年間ビームタイムの兼ね合いから、長期の実験が必要な EDM を視野からはずし、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等、比較的短期間での実験を視野において研究を進めており、相補的に研究協力体制を整えている。

冷却不安定原子 (Fr) による基礎物理研究は、5 年程度の短期的には光格子中にトラップした冷却 Fr 原子による電子 EDM 探索を推進し、10 年程度の中期計画としては、レーザー冷却トラップ Fr 原子数を格段に増強することで、①Fr のボーズ・アインシュタイン凝縮状態の実現による更なる高精度 EDM 探索の遂行、および、②フェッシュバハ共鳴による原子間力制御を用いた Fr-Sr 極性分子生成による超高感度 EDM 探索の 2 つを推進する。これらの系統的な研究により、レプトンセクターにおける CP の破れに関して理解を深める。さらに長期的視野においては、サイクロトロンから供給される一次ビームの強度・種類を増強し、生成・冷却・トラップする不安定原子・放射性元素の種類を拡充することで、電子とともに原子核の EDM 増幅度の大きい元素に対して EDM の測定を行う。

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（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）について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・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。

## 2.7.4 ミューオン異常磁気能率・ミューオン EDM・ミューオニウム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

### 2.7.4.1 概要

ミューオンを用いた精密測定の研究テーマは、標準模型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・時空の対称性の解明である。

ミューオンの異常磁気能率 ( $g-2$ )、EDM および荷電レプトン数非保存過程はいずれも双極子能率として表現され、量子ループの効果として多様な物理過程が現れる物理量である。超対称性粒子などの未知の粒子・相互作用が量子ループとして顕著に現れることが予想されている。

$g-2$  はすべての相互作用の量子ループ効果が包含されるため、従来 QED や電弱相互作用の精密検証のベンチマークとして用いられてきた。近年は、実験精度および標準理論の計算精度が向上し、すでに未知の粒子・相互作用に感度を持つレベルに達している。

荷電レプトン数非保存過程は標準模型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 $\nu$ 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。

### 2.7.4.2 現状

米国ブルックヘ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 (0.54ppm) で測定することに成功し、 $g-2$  が標準模型の予想から  $3.4\sigma$  大きいと報告された[16]。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。この結果は標準模型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微細構造分裂 (HFS) も標準模型から精度良く予想することができる。HFS の実験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、標準模型の予測値を  $g-2$  と独立に検証できる物理量として重要である。

E821 実験の結果を契機に  $g-2$  の標準模型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、近年アメリカ・SLAC やイタリア・INFN・DAPHNE などの高ルミノシティ陽子・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（日、伊）や低エネルギー陽子・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、量子電磁気学（QED）の高次の補正項についても年々継続して計算結果が発表されている。

また近年はスイス・PSI において荷電レプトン数の非保存過程  $\mu \rightarrow e \gamma$  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数の非保存過程の探索実験として、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  $\mu 2e$ （アメリカ・FNAL）などが計画されている。

### 2.7.4.3 展望

前セクションで述べたミュオン基礎物理を巡る新たな動向を受け、米国ではブルックヘブン国立研究所にあるミュ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することで  $g-2$  を 0.14ppm の精度で測定する計画が提案されている（FNAL  $g-2$  実験） [17]。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のミュオン実験装置が稼働を始め、世界最大強度のパルスミュオンビームが供給されている。KEK・理化学研究所などを中心として、J-PARC において、E821 実験や

FNAL  $g-2$  実験とは全く異なる手法を用いてミュオン  $g-2$ ・EDM の精密測定を行う計画が進行している（図 2.7.8）。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 ( $10^7$  秒) 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。

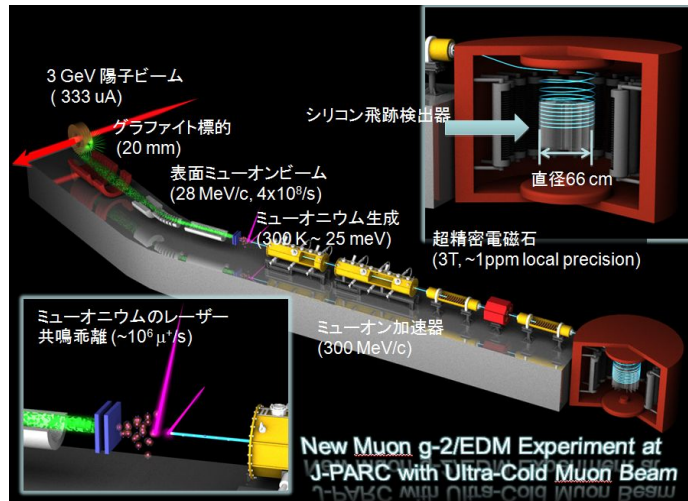


図 2.7.8: J-PARC ミュオン異常磁気能率の精密測定・EDM の探索

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  $g-2$  とは直行しているため、 $g-2$  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  $F_r$  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。

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[18]、平成 23 年 12 月には実験概念設計報告書が J-PARC 原子核素粒子共同利用実験審査委員会へ提出され、現在採択審議が行われている。

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計画が進行中である。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。 $g-2 \cdot$  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  $g-2 \cdot$  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  $\mu_\mu / \mu_p$  も精密に決定できるため、 $g-2 \cdot$  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  $g-2 \cdot$  EDM の測定へシフトすることが検討されている。

## 2.7.5 $0\nu\beta\beta$ 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

### 2.7.5.1 概要

$0\nu\beta\beta$  実験の第一の目標は、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。 $0\nu\beta\beta$  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、 $0\nu\beta\beta$  の寿命を測定することにより、ニュートリノの質量（有効マヨラナ質量； $\langle m_\nu \rangle$ ）を与えることができる。

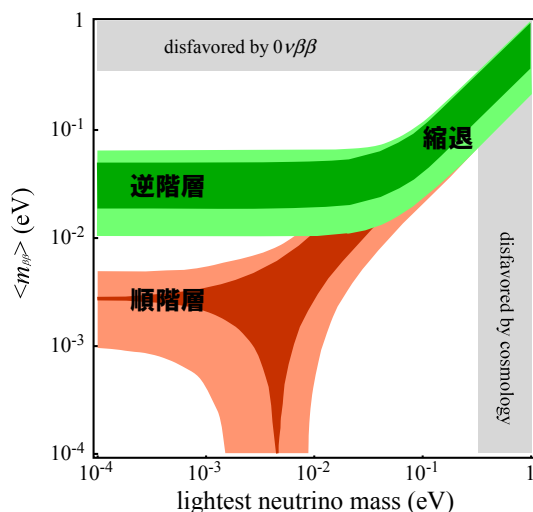


図 2.7.9：ニュートリノ質量の階層モデル。横軸は最も軽いニュートリノの質量で、縦軸はマヨラナニュートリノ質量である。ニュートリノ振動実験の結果から、色付きの領域に制限されている。緑の帯が逆階層、赤の帯が順階層、両者が重なっている部分が縮退型である。

## 2.7.5.2 現状

$0\nu$ DBD 実験は、基本的には標的核を多数用意し、崩壊が観測されるのを待つ ( $T_{1/2} \geq 10^{26}\text{yr}$ )。目標感度は、 $\langle m_\nu \rangle$  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； $\langle m_\nu \rangle \geq 100\text{meV}$ 、2) 逆階層型； $\langle m_\nu \rangle \sim 30\text{--}50\text{meV}$ 、3) 順階層型； $\langle m_\nu \rangle \leq 3\text{--}5\text{meV}$ 。現在、日本を含め世界中で  $0\nu$ DBD 実験が行われ、あるいは計画されている。現在稼働中、もしくは1年程度以内に稼働する予定の装置は1) が目標感度であり、数~10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を行っている。最終的には3) を目指す必要がある。

$0\nu$ DBD 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る計画が立案されている。一方で、観測値である寿命から $\langle m_\nu \rangle$ 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。

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  $0\nu$ DBD 実験が行われてきた。ここ数年程度では大阪大学 CANDLES 実験 ( $^{48}\text{Ca}$ ) と東北大学 KamLAND-Zen 実験 ( $^{136}\text{Xe}$ ) 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が進められている。また、KEK の DCBA 実験 ( $^{150}\text{Nd}$  他) が比較的大型のプロトタイプ装置 (トラッキング型) を製作している他、いくつかの計画が R&D をすすめている。また、海外の稼働中の実験 (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。

## 2.7.5.3 展望

$0\nu$ DBD 実験は宇宙線や環境放射線が測定の本底となる。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、環境放射線に対する遮蔽 (鉛・銅・水など) を備えて設置する必要がある。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と奈良県にある大塔コスモ観測所がある。後者はアクセス性や実験室の大きさなどから、比較的小型のR&D実験などに適しており、一方で、現在の目標感度に必要な大型実験装置を設置可能な施設としては前者になる。

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  $0\nu$ DBD 実験のような稀現象実験に関連する点を列挙すると、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、抗外空気導入とラドンフリーエアの供給、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整備されつつある。

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, 800m 水深相当) に設置されている。イタリアの LNGS (3, 800m 水深相当) は非常に大体積の実験室を持っており、大型の実験装置の設置が可能である。またカナダには現時点で最深度の実験室を持つ SNOLab (6, 000m 水深相当) がある。さらに米国や中国でこれらと同程度か、超える深さを持つ地下実験室の建設が進められている。特に中国では水平アクセスが実現されている。

ニュートリノ質量の階層構造が 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 $\nu$ BD 実験は運が良ければ、ここ数年以内に縮退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、 $^{136}\text{Xe}$  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。一方、 $^{48}\text{Ca}$  と  $^{150}\text{Nd}$  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 ( $Q(^{48}\text{Ca}) = 4.3\text{MeV}$ ) とそれに続く 2 番目 ( $Q(^{150}\text{Nd}) = 3.3\text{MeV}$ ) 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。 $^{48}\text{Ca}$  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。

$^{48}\text{Ca}$ ,  $^{150}\text{Nd}$  とともに、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。 $^{48}\text{Ca}$  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で R&D が行われており、特に前者は実験室レベルでの濃縮に成功している。後者に関しては韓国で商業レベルでの生産（1kg 程度）を行うことを計画しているようである。上記以外の手法も含めた R&D を進め、濃縮度・量などに応じて最適な手法を組み合わせることにより、大量生産手法の確立が望まれる。最終的に 10kmol の  $^{48}\text{Ca}$  を生産する場合、原料として少なくとも 250 トンの  $^{\text{nat}}\text{Ca}$  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。

将来計画と予算について述べる。前述のように、0 $\nu$ DBD 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。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  $^{nat}\text{CaF}_2$  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、 $^{48}\text{CaF}_2$  シンチレータを順次作成し、 $^{nat}\text{CaF}_2$  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、 $^{nat}\text{CaF}_2$  シンチレータを主とした検出器の建設に 10 億円前後（ $\text{CaF}_2$  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、仮に化学的手法を採用するとして、主たるコストはクラウンエーテルであり、これを現在の数分の 1 程度に抑える（中国での生産など）ことが可能になると数十億円程度と見積もられる。

## 2.7.6 DM 探索実験

### 2.7.6.1 概要

DM とは宇宙の全質量／エネルギーの内、23 %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。その正体としてはいくつかの候補が考えられており、その中でも有力なものは 1) WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)、2) axion である。前者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。後者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る。

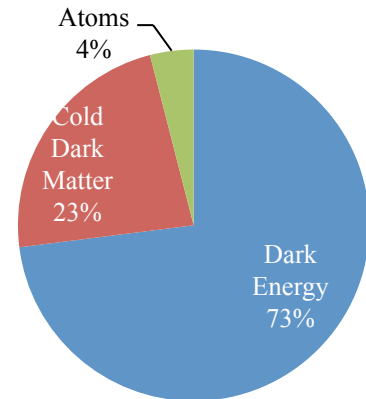


図 2.7.10 : 宇宙背景放射の精密測定、その他の結果から求められた宇宙のエネルギー物質構成図。宇宙はそのほとんどが未知（暗黒エネルギー；73%、暗黒物質；23%）であることがわかる。

### 2.7.6.2 現状

ダークマター探索実験は、ダークマターが WIMPs あるいは axion 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。原子核分野に関連が深い実験は、我々の銀河系のハローがダークマターから構成されていると仮定して得られる地球近傍でのダ

ークマター密度に対して、直接検出する（直接実験）ことを目指している。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ダークマター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。以下 1) WIMPs 探索、2) axion 探索について、述べていく。

WIMPs 探索では、WIMPs との弾性／非弾性散乱による、検出器中の原子核の反跳信号を検出する [20]。そのエネルギーは低く（数～数十 keV 程度）、また稀であるため、超低放射性雑音環境中に大量の標的原子核を用意する必要がある。そのため、地下実験室に放射性不純物の少ない大型の検出装置を設置する必要がある。また、信号が WIMPs 由来であることの証拠として、年周変化／日周変化を調べる必要がある。前者は、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になる。後者は、地球の自転に伴うもので、信号の反跳方向を測定できる検出器が必要になる。

日本国内では、液体キセノンを標的原子核とした東京大学の XMASS 実験が岐阜県飛騨市神岡鉱山内の地下実験室に建設され、測定が開始された。一方、方向感度を持つ検出器として、気体のフッ素化合物を標的原子核とした京都大学の NEWAGE 実験が同様に神岡実験室内で 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たダークマター探索実験の準備を進めており、徳島大学では、WIMPs と原子核の非弾性散乱に注目した PICO-LON 実験の R&D を行っている。

axion 探索では、強磁場中でのプリマコフ効果を利用し、axion を光子に転換してその光子を検出するか、レーザー光子を axion に転換しその影響を検出することになる [21]。前者はさらに、銀河ハロー axion を強磁場中に設置された共振空洞中でマイクロ波に転換し、そのマイクロ波を検出するもの (axion haloscope)、太陽中心で生成された axion を太陽に向けた磁場中で X 線に転換し、その X 線を検出するもの (axion helioscope) に分けられる。マグネットを利用する代わりに結晶格子の電場を利用する実験もある。後者については、強磁場中にレーザーを通し、axion と光子との結合によってレーザーの偏光度等の変化を調べる実験や、強磁場中でレーザー光を axion に転換し、壁を突き抜けた axion を再度強磁場中で光子に転換する実験などがある。

日本国内では、axion haloscope 実験として、Rydberg 原子を利用して転換マイクロ波光子の単光子検出を行う京都大学の CARRACK 実験が R&D を進めている。また axion helioscope 実験では、東京大学の SUMICO 実験が結果を出している。レーザー実験については、KEK のグループが取り組みを始めているところである。

### 2.7.6.3 展望

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、環境放射線に対する遮蔽（鉛・銅・水など）を備えて設置する必要がある。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を参照のこと。

axion 探索実験においては、特殊な実験環境は必要としない。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 (axion

haloscope の場合) といった点が挙げられる。

将来計画と予算について述べる。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。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いるが、ダークマターであることの確認や、その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。感度向上については、必要な統計量を得るための大型化と S/N 比の向上を同時に進めていく必要がある。後者に関しては、特に粒子弁別能力を高めること、あるいは  $\beta/\gamma$  線に感度のない検出器を採用することといった R&D が世界的にも盛んにおこなわれており、研究の進展が望まれる。

axion 探索実験においては、理論的なモデルはほぼ 2 つに絞られており、その中で結合の弱い (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行うことを目標としている。一方で、axion の質量は理論的にはフリーパラメータであり、現在は実験と宇宙・天体物理学的議論によって制限を受けてはいるが、4 桁 ( $10^{-6} \leq m_a \leq 10^{-2}$  eV 及び 1 eV 付近) にわたる広い領域に可能性が残っている。axion helioscope とレーザー実験は重い質量領域を、haloscope 実験は軽い質量領域を得意領域としており、相補的に実験を進めていく。ダークマターとしての axion を探す halo-scope 実験では、探索する axion の質量に応じて磁場中の空洞の共振周波数を変えていく必要があり、 $m_a \sim 10^{-3}$  eV 付近では、共振空洞の大きさが小さくなりすぎてしまう。この質量領域での探索には何らかの新しいアイデアが必要である。

### 2.7.7 高エネルギー実験との関連

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。

### 2.7.8 他の Working Group との関連

繰り返しになるが、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。

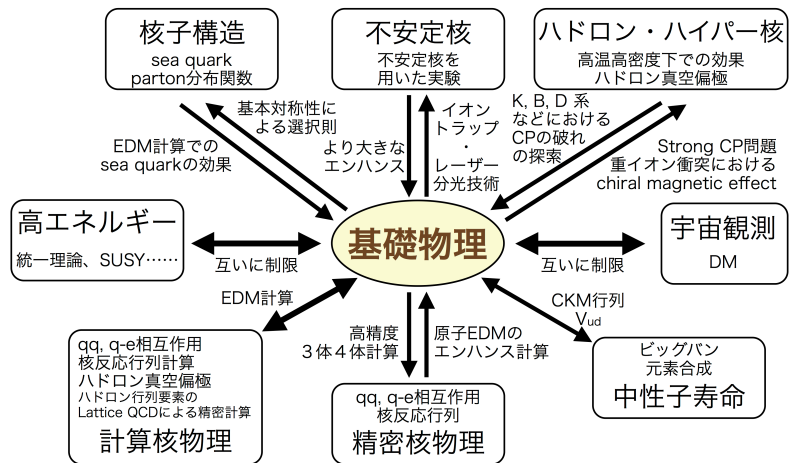


図 2.7.11 : 他の Working Group との関係

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。

2.7.9 タイムライン

想定される各実験の計画を年表にまとめる。いずれの探索実験もどこかで「新しい発見」があった場合はその詳細な測定に移行し、他の実験はその検証としての意味を持つことになる。

	2011-2015	2016-2020	2021-2025	2025-2030	
反陽子	ELENA建設 反水素マイクロ波分光	→	→	→	
EDM	nEDM UCN源建設	→ 10 <sup>-27</sup> e cm	→	→ 10 <sup>-28</sup> e cm	いずれの実験も新物理発見後はその詳細測定に移る
	原子EDM 磁束計高度化、原子トラップ増加	→	→ 10 <sup>-28~30</sup> e cm		
μ	μビームライン建設 μ → eγ 10 <sup>-14</sup>	→ g-2 0.1ppm EDM 10 <sup>-21</sup> e cm	→	→ μ EDM探索 10 <sup>-24</sup> e cm	他の測定量との整合性・関連性を確認する必要がある
0νββ	縮退領域 地下大実験室	→ m <sub>ν</sub> ~ 0.1eV	→	→ 逆階層領域 濃縮工場 m <sub>ν</sub> ~ 30meV 順階層領域 m <sub>ν</sub> < 10meV	
DM	WIMPs	→ σ <sub>n</sub> ~ 10 <sup>-46</sup> cm <sup>2</sup>	→	→ σ <sub>n</sub> ~ 10 <sup>-48</sup> cm <sup>2</sup>	
	DM axion探索	→ より軽い領域 m <sub>a</sub> ~ O(10 <sup>-5</sup> ) eV	→	→ より重い領域 m <sub>a</sub> ~ O(10 <sup>-4</sup> ) eV	



## 2.7.10 リソース

必要となる施設、人員をまとめる。

	施設	予算	人員
反陽子	ELENA建設 (CERN) 既にCERNで建設許可、予算承認	科研費 2 億 年間 数千万円	10人規模
EDM	UCN源建設 (J-PARC) 磁束計高度化、原子トラップ増加 東北大CYRIC高強度化、ビームライン建設	30億円 年間 数千万円 10億円	実働 18 人・年 × 5 年～ 小数だがコンスタ ントな人員確保
$\mu$	$\mu$ ビームライン建設 (J-PARC)	30億円	100人 (2012年現在91人)
0 D B D	地下大実験実 nat.CaF <sub>2</sub> シンチレータ検出器 同位体 <sup>48</sup> Ca濃縮工場	100億円 10億円 数10億円	20～30人 40～50人 (技術者含む)
DM	WIMPs axion	10億円 (大規模実験) 数億円 (R&D) 10億円 (haloscope) 2億円 (helioscope) 2億円 (laser R&D)	20～30人 計 15 人

## 2.7.11 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。

2.7 核物理的手法による基礎物理

各種 EDM 実験の一覧

粒子	現状		計画	
	手法	上限値 [e cm]	手法	目標感度
中性子	超冷中性子蓄積	$2.9 \times 10^{-26}$	高密度超冷中性子蓄積	$10^{-27 \sim -28}$
原子核	Hg原子セル	$3.1 \times 10^{-29}$	Xe原子セル/不安定原子核ビーム	$10^{-30}$
電子	Tl 原子ビーム	$1.6 \times 10^{-27}$	中性 Fr 原子トラップ	$10^{-27 \sim -28}$
$\mu$	磁気蓄積リング	$1.9 \times 10^{-19}$	高精度磁気蓄積	$10^{-22}$
$\tau$	$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-\gamma$	$3.1 \times 10^{-16}$		$10^{-20}$
電子 (分子)	YbF分子	$10.5 \times 10^{-28}$	YbF/ThOなど	$10^{-29}$
陽子/重陽子	Tlスピン共鳴	(p) $5.4 \times 10^{-24}$	蓄積リング	$10^{-29}$ (d)

各種  $0\nu$  DBD 実験の一覧

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

各種 DM 実験の一覧

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

## 参考文献

- [1] M. Hori et al., *Nature* **475**, 484 (2011).
- [2] Y. Enomoto et al., *Phys. Rev. Lett.* **105**, 243401 (2010).
- [3] G.B. Andresen et al., *Nature Physics* **7**, 558 (2011).
- [4] J.S.M.Ginges, V.V.Flambaum, *Phys. Rep.* **397**, 63 (2004).
- [5] C. A. Baker et al., *Phys. Rev. Lett.* **97**, 131801 (2006).
- [6] <http://ucn.web.psi.ch/>
- [7] <http://nuclear.uwinnipeg.ca/ucn/triumf/>
- [8] <http://p25ext.lanl.gov/edm/edm.html>
- [9] 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](http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_1001/pdf/KEK_J-PARC-PAC2009-11.pdf)
- [10] W.C.Griffith et. al, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 101601 (2009).
- [11] M.A.Rosenberry and T.E.Chupp, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 22 (2001).
- [12] M.P. Ledbetter and M.V.Romalis, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 287601 (2002).
- [13] A. Yoshimi, T. Inoue et al, *Phys. Lett. A* **376**, 1924 (2012).
- [14] M.V.Romalis, W.C.Griffith, J.P.Jacobs, E.N.Fortson, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 2505, (2001).
- [15] J.J. Hudson et. al., *Nature* 473 (2011) 493.
- [16] BNL E821 experiment, *Phys. Rev. D* **73**, 072003 (2006).
- [17] New muon g-2 experiment at Fermi lab, <http://gm2.fnal.gov/>
- [18] Muon g-2 experiment at J-PARC, P34 proposal submitted to J-PARC PAC (2009).  
[http://j-parc.jp/NuclPart/pac\\_1001/pdf/KEK\\_J-PARC-PAC2009-12.pdf](http://j-parc.jp/NuclPart/pac_1001/pdf/KEK_J-PARC-PAC2009-12.pdf)
- [19] F.T. Avignone III, S.R. Elliott and J. Engel, *Rev. Mod. Phys.* **80**, 481 (2008).
- [20] G. Bertone, D. Hooper and J. Silk, *Phys. Rep.* **405**, 279 (2005).
- [21] L.J. Rosenberg and K.A. van Bibber, *Phys. Rep.* **325**, 1 (2000).