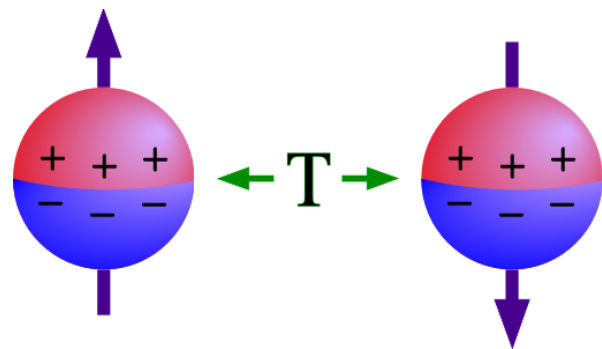


演習課題 8: 時間反転対称性の破れの探索 ～ フェルミオン電気双極子能率 ～

素粒子反応の方程式では、粒子と反粒子の入れ替え(C)、鏡面反転(P)、時間反転(T)をした方程式と区別することができない CPT 定理というものがあります。これに従えば、2008 年のノーベル物理学賞を受賞した小林、益川の理論でも有名になった CP 反転対称性の破れは、自動的に時間反転対称性の破れを導きます。その時間反転対称性の破れを直接的に探してやろう、というのが本演習テーマにある電気双極子能率なのです。

電気双極子能率 (electric dipole moment - EDM) は、永久電気双極子能率 (permanent EDM) とも呼ばれ、これが有限の値ならば、直接的に時間反転対称性の破れが現れます。電磁気学でおなじみの電気双極子能率 (電気双極子モーメント) $\vec{\mu}$ は、電荷 q とベクトル \vec{l} により、一般に $\vec{\mu} = q\vec{l}$ と定義されます。中性子、電子、陽子などスピンを持つ粒子では、ベクトル \vec{l} をスピンにとると、時間反転でスピン方向は反転しますが、電荷分布は反転しないため、右図のように EDM が存在すると時間反転対称性が破れます。

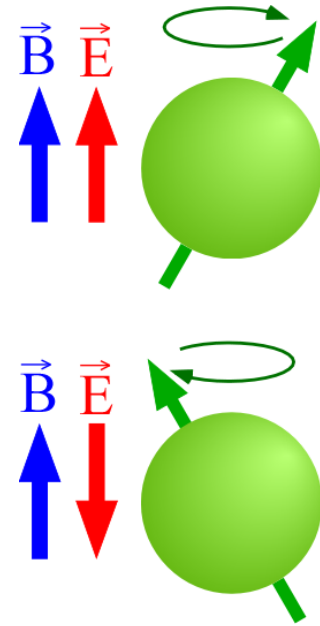


小林・益川理論による CP 対称性の破れは非常に小さく、これと CPT 定理から導かれる中性子の EDM は $10^{-30} [e \cdot \text{cm}]$ (e は電子電荷) 以下程度になると考えられています。一方、宇宙論が示唆するところによると、物質 (バリオン) 優勢である我々の宇宙が生まれるためには、小林・益川理論から予想される CP 対称性の破れよりも、もっと大きな程度で CP 対称性が破れていなければなりません。すなわち、CPT 定理が正しければ、時間反転対称性も大きな程度で破れていなければならないのです。このように大きな対称性の破れを説明するために、超対称性理論をはじめとするさまざまな素粒子論のモデルが提唱されています。

実験による素粒子・核物理学研究の方向性には、大きく分けて、ふたつのベクトルがあります。ひとつは、より高いエネルギーで起こる新しい物理現象を探る方向、もうひとつは、高い精度による測定で新しい物理現象を探索する方向です。より高いエネルギーで起こる物理現象を調べる energy frontier experiments の代表例として、現在、欧州合同原子核研究機関 CERN で進められている LHC 実験を挙げることができます。また、非常に希にしか起こらない物理現象を精密測定で捉えようとするものに KEK の BELLE 実験や神岡のニュートリノ実験を挙げることができるでしょう。この演習で扱う EDM 探索実験も精密測定の代表格で、世界中で、中性子、電子、原子、原子核を用いた研究が進められています。

この演習では、スピン偏極した ^{129}Xe 原子核を用いて EDM の探索を行います。実験で用いる ^{129}Xe 原子核は、スピン $\hbar/2$ で、磁気モーメントを持っており、静磁場中で歳差回転をします。これに静電場を加えると、EDM が存在すれば、磁気モーメントによる歳差運動に加え、EDM が静電場中で歳差運動をする効果が加わり、歳差回転の周期が変化します。そこで、静磁場は一定に保ったまま、静電場の極性を磁場と同じ向きにした時と反対にした時とで歳差回転周期の差を測定すれば、EDM が検出できるのです。

^{129}Xe 原子核の歳差回転周期は、核磁気共鳴 (nuclear magnetic resonance - NMR) の手法で測定します。スピンのそろった ^{129}Xe 原子核が歳差回転をするときに生じる微小な電磁波を、共振コイルや超低雑音アンプで捉えるのです。



実習項目

1. NMR 装置を作る

実験の基本は手作りです。自分で導線を巻いて、 ^{129}Xe 原子核に歳差運動を引き起こすドライブ・コイルや微小な電磁波を捉えるピックアップ・コイルを製作します。これらのコイルは、もちろん自分で設計します。微小な電磁波を効率良く捉えることができるよう工夫をしましょう。

2. 信号を見る

製作したコイルを 3 次元的に配置し、NMR 装置として動かしてみます。さまざまな調整を行い、設計値どおりにできたか、装置の基本特性を調べます。

3. EDM 探索実験

いよいよ本番です。スピン偏極した ^{129}Xe 原子核の NMR 信号を測定し、データ解析により歳差回転周期を求めます。電場の極性を反転させ、時間反転対称性の破れを探しましょう。そして、自分のアイデアで装置や測定方法を工夫して、測定精度を上げてみましょう！

