

REBUNCER RESONATOR FOR PULSED ULTRA-COLD NEUTRONS

Y. Iwashita^{A)}, M. Kitaguchi^{B)}, T. Yoshioka, S. Imajo, K. Mishima, Y. Nasu, Y. Fuwa, Y. Arimoto, H. M. Shimizu

^{A)} Kyoto University, Gokasho, Uji City, Kyoto 611-0011

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba City, Ibaraki 305-0801

Abstract

Precise measurement on the neutron Electric Dipole Moment is planned. It needs high spatial density of neutrons to reduce both static and systematic errors. In order to make use of the high peak power possibly available at J-PARC, so call rebuncher can be used to transport Ultra Cold Neutrons keeping the high spatial density at a UCN storage chamber for the EDM measurement. The rebuncher is a spin flipper whose magnetic field level can be controlled by RF frequency applied. The frequency range is from 15 MHz to 30 MHz that should be swept in 0.2 s. The needed magnetic field is 10 Gauss. Research and Development status is reported.

中性子 EDM測定用リバンチャーRF共振器

1. 超冷中性子を用いた中性子電気双極子能率の測定

電荷を持たない中性子が電気双極子能率 (EDM) を持つと時間反転対称性を破る。その上限値の測定により、統一理論など、多くの理論の検証ができる (図1参照)。図2に示すように、1950年代からその上限が押さえ込まれてきていて、現在、 2.9×10^{-26} e cm (90%CL)まで追い込まれている。標準理論が予言する値はまだ5桁ほど先であるが、現状より少し(1~2桁)追い込めばいくつかの理論が排除され、また、もし検出されれば標準理論に修正が必要になる。

中性子は磁気双極子能率を持っているため、磁場中で歳差運動を起こす (図3参照)。EDMを持てば、電場により同様の効果を与えるので、電場を磁場に対して平行、及び、反平行に掛けたときの歳差運動の周波数の差を測定すれば、この効果を観測することが出来る。実際には、終状態のスピンの向きの違いを測定することになるが、これは掛けた電場 E と持続時間 T の積に比例し、 $ET=10^6$ s kV/cm 程度が現時点での目標となる。具体的には、二通りの測定方法があり、時間が短くても高い電場を掛けるか、多少低い電場で長時間測定をするかである。前者では単結晶中の格子間での電場を利用するものだが、空間が小さいため時間が短くなり、単結晶による冷中性子の回折を使った実験の準備が進められている。後者では、中性子を一定空間内に閉じ込めて時間を

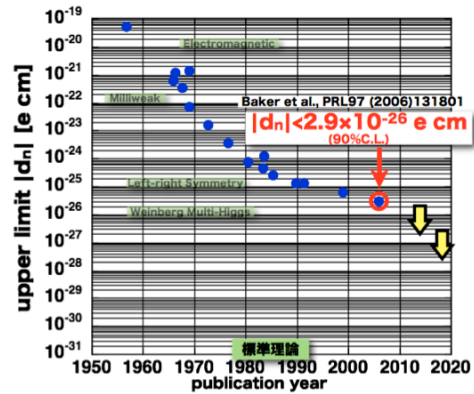


図2: 中性子 EDM の観測上限値の年代による向上

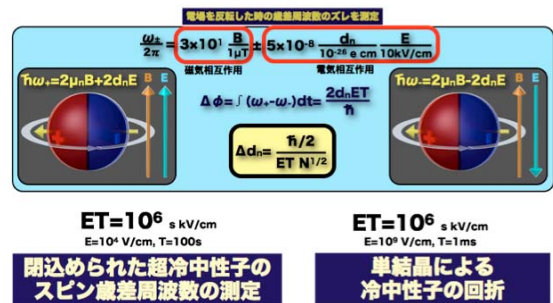


図3: 中性子電気双極子能率の測定原理

電気双極子能率

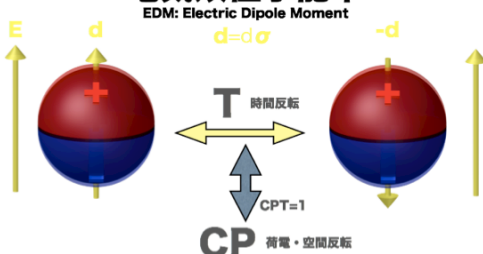


図1: 中性子電気双極子能率は時間反転対称性を破る

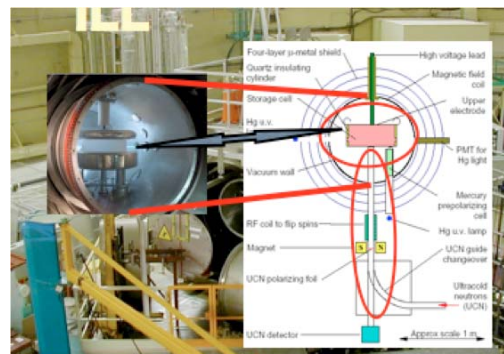


図4: ILLに於ける先行実験

稼ぐ方法であり、中性子の寿命程度蓄積時間を稼ぐことが出来る。先行実験はもっぱらこの後者で、ILL、PSI 等で鋭意進められている。誤差は統計誤差と系統誤差で決まり、前者は中性子の個数、後者はもっぱら磁場精度で決まる。中性子の個数は、閉じ込め空間の体積と中性子密度で決まる。測定するのは歳差運動の回転角の差であるため、この空間中の磁場の非一様性が系統誤差となるが、体積が大きいと不利になる。図5は ILL の場合のこれらの誤差評価

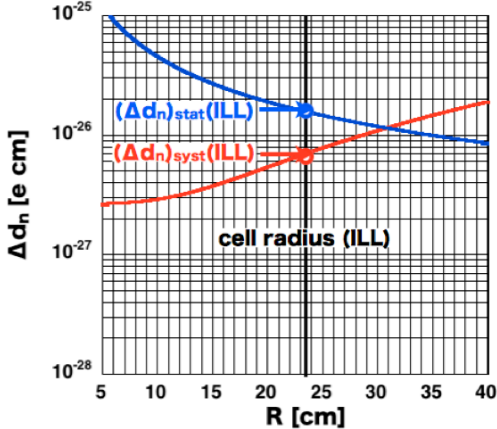


図5: ILL の場合の誤差評価

値であり、統計誤差が支配的であることが判る。もし中性子密度が多くできれば上限を約半分に下げられよう。

2. 中性子の特徴

ここで、中性子の特徴のおさらいをしておく。冷中性子は、その特徴から、基礎物理の格好の材料になりうる(図6)。まず強い相互作用に関して冷中性子は、波長が1nmを越えているため、個々の原子核と直接反応する確率が小さく、物質中では核ポテンシャルを原子の体積で平均化したポテンシャルとして感じる。例えば、Ni 固体中では、真空のそれと比べて 244neV 程度高いことが知られている。このため、Ni は中性子導管の内面に鏡面材としてよく使われている。また、電磁相互作用に関して、1 T の磁場中では、その磁気能率が平行、反平行の場合で ±60neV となる。これを利用して偏極磁気ミラーが作られている。さらに、重力に関してもその重力質量から、地球上で1mの落差で 103neV となる。これら3者はほぼ同程度のオーダーとなり、これらを

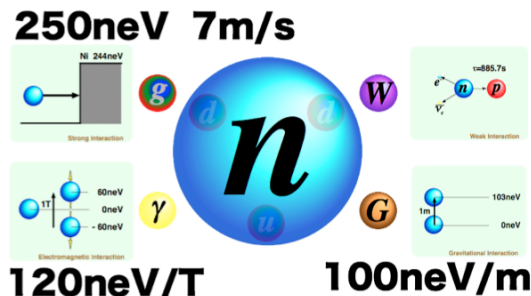


図6: 中性子の持つ特徴

組み合わせて使うことにより様々な観測が可能となる。また、弱い相互作用からは、中性子のベータ崩壊が起こるが、その寿命は高々4桁の精度でしか測定されていない。中性子の寿命は宇宙開闢時からの元素組成比に影響を与えるため、この測定精度を上げることにより、SUSY などの検証が可能になる。これらの特長を生かすためには、中性子の運動エネルギーがこれらの値に近い若しくは低い必要があり、そのような中性子を超冷中性子(UCN)と呼ぶ。UCN は内面が適当な物質であれば、容器に閉じ込めることが出来る。

3. 超冷中性子の生成

中性子は実際には、我々の身の回りにある物質質量の半分以上を占めているにも拘わらず、単離するには何らかの核反応を用いる必要があり、X線管のように手軽ではなかった。また、その発生エネルギーも核エネルギーのオーダーであるため、減速材を使って減速する必要がある。これで冷やすことが出来るのは熱中性子(温度換算で室温 300K 程度のエネルギー、25meV 程度)程度までである(図7参照)。これは、熱中性子ですでに波長が1Å以上になり、散乱でエネルギーを失うことが難しくなるためである。このため減速効率が極端に下がり、この手法のままだと、マクスウェル分布のほんの裾野にある UCN だけが利用可能となる。そこで、フォノン励起など別の機構を使ってコンバートし、低温化する必要がある。図8に示すように PSI と TRIUMF ではそれぞれ違うコンバーターが用いられる予定だ

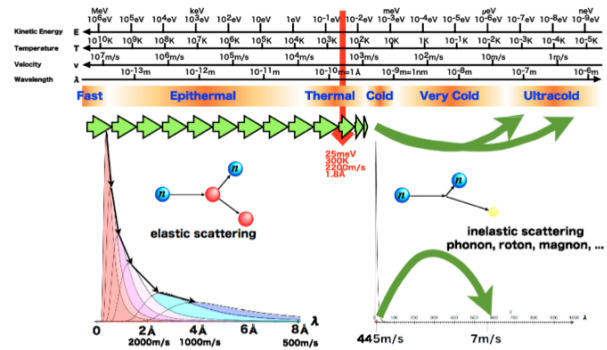


図7: Superthermal UCN 発生

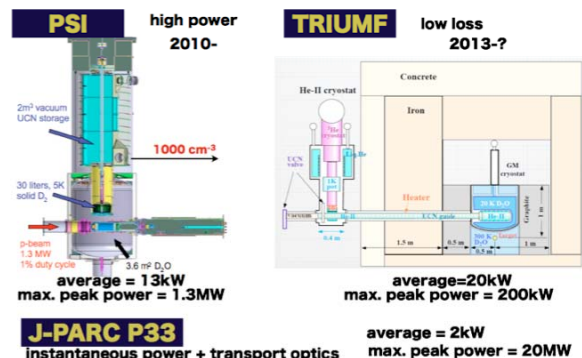


図8: 既存のUCN源と J-PARC P33

が、ここで着目すべきはそのピークパワーである。J-PARC での実験（入射時以外のライナックのビームを使う）を考えた場合、そのピークパワーは 20 MW に達し、他の計画を大きく引き離している。これの有効利用を考えた場合、コンバーター中の寿命が多少短くても発生量の多い固体重水素を使うのが合理的である（図 9 参照）。この場合、パルス内での UCN 密度は大変大きくなる。一方、EDM 測定用の中性子容器は磁場の精密測定などが必要なため、発生源から離れたところに置く必要があり、発生源とはガイド管で繋ぐ。発生中性子は速度拡がりが大きく、発生源と容器は数m離れているので、拡散によりせつかくの高密度性が失われかねない。

加速器では、このような場合、輸送系の中間点に rebuncher 加減速空洞を置いて、広がりかけたバンチを再集束することが出来る。この加減速空洞の加速電圧、位相は早く来た高エネルギー成分を減速してやり、遅く来た低エネルギー成分を加速してしかるべき場所に集束してやるように選ぶ。

固体重水素(sD₂)コンバーター

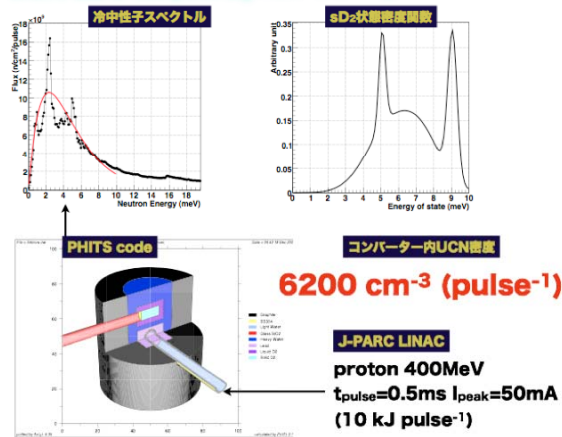


図 9: 固体重水素コンバーターはパルス発生に適している

4. UCN rebuncher

UCN においても同様の仕掛を考えることが出来る。中性子は磁気双極子を持っているため、静磁場中でポテンシャルを感じる。スピンの変化しなければ静磁場中に入る時と出る時で加減速が相殺してそのエネルギーに変化はないが、静磁場中でその歳差運動に等しい周波数の RF 磁場を掛けてやるとスピンの反転し、感じるポテンシャルが逆転する（この歳差運動の周波数は磁場強度だけで決まることに注意）。このため、スピンの反転する場所での磁場に対応する加減速量が得られる（図 10 参照）。

さて、ここで重要なのは、必要な加減速量が時間の関数であることである。もっとも素朴には、磁場を時間変化させればよいのだが、EDM 測定では磁場の超精密測定が必要なため、近傍の磁場はなるべく変化させたくない。そこで、比較的短い領域内で大きな磁場勾配を作り、時間に応じて RF 周波数を

変調させてやれば、その周波数に対応する磁場強度でスピン反転が起こり、その磁場強度に比例したエネルギー分の加減速が可能になる。従って、この原理を用いれば、UCN rebuncher が構成できる。これにより、UCN 源での高空間密度を速く離れた中性子容器の場所で再現でき、系統誤差を減らすための小さい容器でも統計精度を稼ぐことが出来るようになる（図 11 参照）。現在 J-PARC BL05 での原理実証実験を進めている（図 12 参照）。

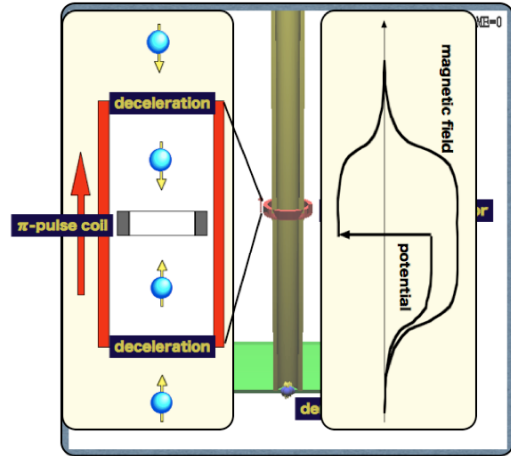


図 10: UCN rebuncher

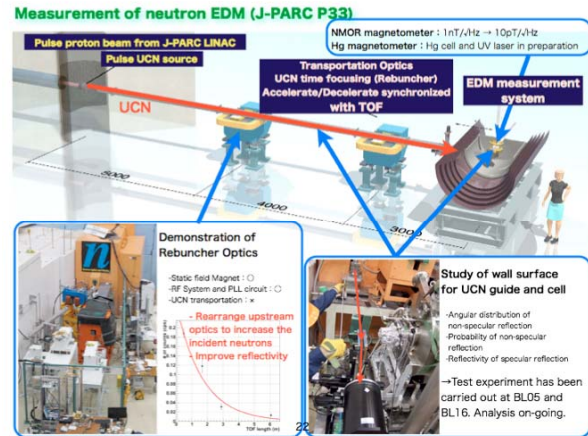


図 11: P33 で想定しているレイアウト

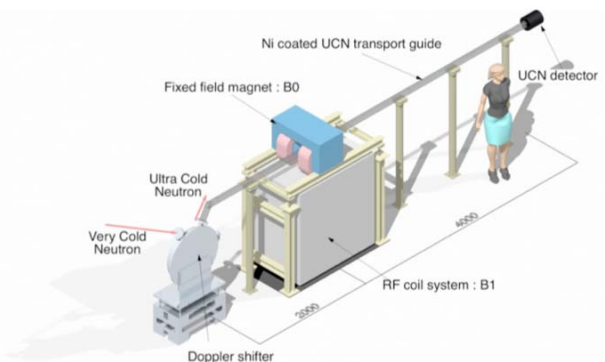


図 12: J-PARC BL05 での実証実験

5. Rebuncher の構成要素

スピン反転の条件は静磁場中でのプリセッション周波数とRF周波数が一致することであり、RF周波数を決めると、静磁場強度および加減速エネルギーは一意に決まる。比較的短い領域で磁場が大きく変化する（進行方向に大きな勾配を持った）静磁場があればTofとしてはほぼ同じと考えられる時刻内にどの磁場強度も感じるため、周波数だけを制御すれば加減速エネルギーを制御することができる。このため、勾配静磁場と周波数掃引可能なRFが必要である。

まず、勾配静磁場は磁気異方性中間磁極^[1]を用いることにより容易に小形化が実現できることは今回有本により報告されている^[2]（図13参照）。詳細は省略するが、25cmで0.2T～1Tまで変化する磁場勾配がギャップ10cm、幅6cmの領域で実現されている。中間磁極を用いることで磁場強度に依らず、磁場分布形状は相似を保っている。

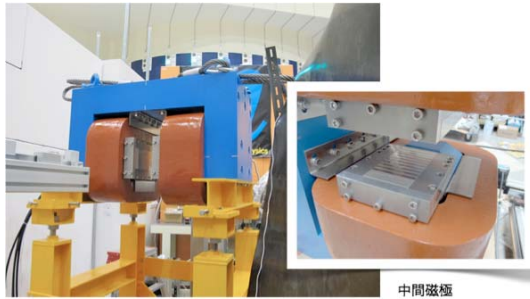


図 13: 異方性中間磁極付き電磁石

つぎにRFであるが、今回周波数は15～30MHz程度の可変範囲を持たせれば良く、他励方式を採用した。時間と共に回るバリコンの静電容量で決まる変調された共振点に発振周波数を合わせ込むため、PLL（Phase Locked Loop）を構成している（図14参照）。共振点の近傍では入力RFの位相と共振器内の位相のズレが共振点からの周波数のズレに比例することを利用してVCO(Voltage Controlled Oscillator)のFM入力へ負帰還を掛け、同調を達成している。ロックレンジが広いため、位相比較器に入る前の2本のケーブルの長さを等しくするなどの注意が必要である。RFの磁場強度は10 Gauss程度が要求されることと、RFコイルにガイド管を抱かせる必要から、幅20cmほどの一巻きのコイルにバリコンを繋いで共振回路とし、バリコンをパルスモーターで廻して同調を取る（図15参照）。

動作は2秒毎に0.2秒間駆動する間欠運転で、この0.2秒間に周波数を2倍振る必要がある。パワーが必要なのはこの0.2秒間だけであるが、つねにPLLがロックのかかった状態にしておくため、休止時も数%の電力を入れておくようにしている。図16に示すように、数100WのRF電力投入で10 Gauss以上のRF磁場が発生できた。また、RF磁場分布も測定し、シミュレーションと矛盾がないことを確認している。

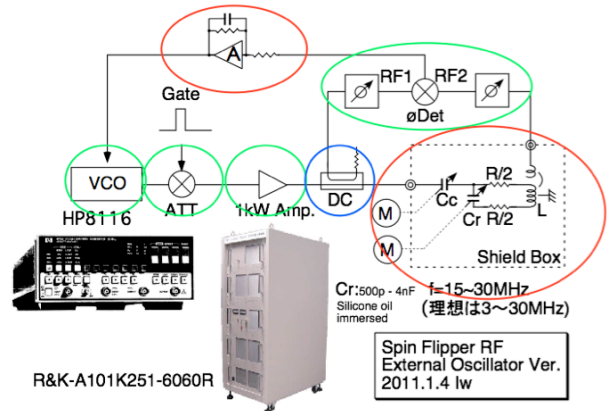


図 14: RF回路ブロックダイアグラム

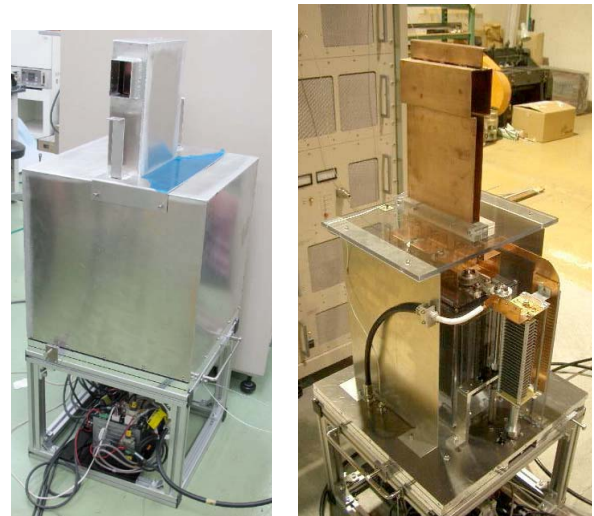


図 15: Rebuncher RF 共振器の外観と内部

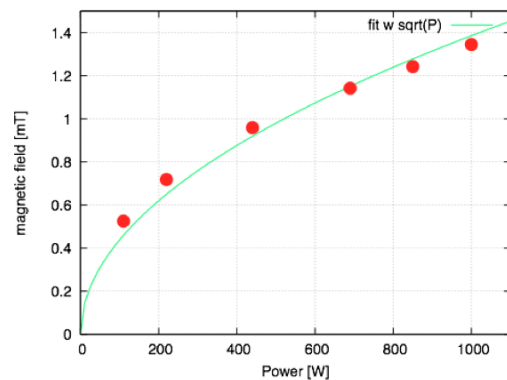


図 16: 投入RF電力と発生磁場

これらを使って総合的な検証をMLF BLO5で行う予定であったが、先行してILLにて原理検証実験を行う予定である。

参考文献

- [1] Y. Iwashita et al., IEEE Trans. Appl. Super Cond., 16, No. 2, (2006)1287.
- [2] Y. Arimoto et al., MOPS123 in this meeting.