

強磁場中における水素原子の断熱状態

山田和善¹、加藤太治^{2,1}¹九州大学、²核融合研

近年、電磁濃縮法[1]やレーザー駆動キャパシタ・コイル法[2]により実験室内でキロテスラ級の超強磁場が実現可能となった。また、XRISM[3]などによる磁気宇宙プラズマの詳細な観測から超高強度磁場下の原子過程の理解が進むと期待されている。そこで本研究は、高強度磁場下での原子に束縛された電子の反磁性ケプラー運動と電磁波スペクトルの高精度な量子論的計算手法の開発を目的としている。

本研究では、一様磁場中の水素原子に束縛された電子の反磁性ケプラー運動を対象とした。この系は、原子核のクーロン場による球対称のケプラー運動と外部磁場による円筒対称のサイクロトロン運動が競合する非可積分系であり、一般に解析解が得られないため数値的解法が不可欠となる。そこで本研究では、動径座標 r を断熱パラメータとして電子波動関数を断熱近似解で展開する断熱基底展開法を採用し、得られた断熱状態の物理的な考察を行った。

球座標系での動径座標 r を断熱パラメータとした断熱ハミルトニアン \hat{H}_0 のシュレーディンガー方程式を数値的に解くことで、断熱近似解（断熱ポテンシャルエネルギーと断熱チャンネル関数）を求めた。図1は断熱ポテンシャルエネルギー（470 T, $|m| = 0, 10, 20$ ）と対応するリッジポテンシャル曲線（ $l = |m|, \theta = \pi/2$ ）であり、両者とも常磁性項によるエネルギーシフトを除いている。ここで、リッジポテンシャルは遠心力ポテンシャルと $z = 0$ （ $\theta = \pi/2$ ）平面上の束縛電子が感じる有効ポテンシャルの和である。断熱パラメータの増加に伴い、断熱ポテンシャルエネルギーは遠心力ポテンシャルからサイクロトロン運動のランダウ準位に漸近する。両者の移行は断熱ポテンシャルエネルギー曲線の擬交差列を境に起きており、リッジポテンシャル曲線は正確に擬交差列に沿っている。断熱チャンネル関数も擬交差列を境に球面調和関数から z 軸に垂直な平面上での二次元の調和振動に漸近する。

このことから断熱状態における2運動状態間の遷移は反磁性相互作用ポテンシャルの尾根に沿って形成される擬交差列で生じることを明らかにした。加えて、擬交差列では非断熱効果が顕著であるため、運動状態の遷移において非断熱結合が重要であることが示された。このような知見は、ケプラー運動とサイクロトン運動が相互作用する系の高精度な量子論的計算手法の開発において重要である。

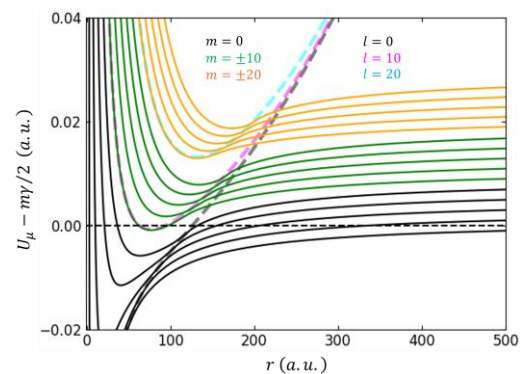


図 1: 常磁性項を除いた断熱ポテンシャルエネルギー $U_\mu - m\gamma/2$ ($B_z = 470$ T) と擬交差列。破線は常磁性項を除いたリッジポテンシャル $U_{ridge} - m\gamma/2$ ($l = |m|, \theta = \pi/2$)。エネルギー $1 a.u. \simeq 27.21$ eV、長さ $1 a.u. \simeq 5.292 \times 10^{-5} m_0$ 。

参考文献

- [1] D. Nakamura et al., 2018, Review of Scientific Instruments 89, 095106.
 [2] S. Fujioka et al., 2013, Sci. Rep. 3, 1170.
 [3] XRISM Science Team, 2020, arXiv:2003.04962v1 [astro-ph.HE].