

高強度磁場中の水素原子波動関数の断熱展開法の開発

山田和善¹、加藤太治^{2,1}

¹九大総理工、²核融合研

外部磁場中のリドベルグ状態の電子は、古典力学では不安定な周期軌道をもつカオスを示すことが知られ、その量子状態との対応関係は基礎物理の問題として興味深い。よく知られている例として、数テスラ程度の外部磁場中のリドベルグ状態の電磁波吸収スペクトルに現れる準ランダウ共鳴構造(図 1)[1]について、半古典論的および量子論的研究が多数行われた[2]。近年では、1000 テスラに及ぶ超高強度磁場の発生が実験室でも可能となり、そこでの原子素過程や化学反応過程が注目され始めている。

本研究の目的は、非摂動論的な外部磁場の効果、いわゆる反磁性ケプラー運動をする電子波動関数の正確な数値計算法の開発である。これにより、超高強度磁場中の原子やイオンの電磁波吸収スペクトルの正確な予測、および対応する量子状態を明らかにする。また、本研究の成果は、磁場閉じ込め核融合プラズマや宇宙磁気プラズマからの電磁波スペクトルの解析においても重要な基礎的知見を与えると考えている。

現在、一様磁場中の水素原子を対象とした研究を行っている。この系は、原子核を中心とするケプラー運動と磁力線周りのサイクロトン運動が競合する非可積分系であり、本研究では物理的に見通しの良い数値解を得るために、動径座標を断熱パラメータとする断熱状態によって波動関数を記述する方法(断熱展開法)を採用した。

図 2 は、本研究で得られた各断熱状態のエネルギー固有値 U_μ を動径座標の関数としてプロットしたものである。原点付近ではケプラー運動の遠心力によるポテンシャル曲線の立ち上がりが見られ、 r 遠方ではサイクロトン運動による等間隔のランダウ準位を示している。また、中間領域ではポテンシャル曲線の擬交差列が見られ、それを境にケプラー運動からサイクロトン運動へ移行していると考えられる。また擬交差列は、磁場に垂直な平面($z = 0$)上での古典軌道上にある電子が感じるポテンシャル $V(\rho = r)$ に沿っており、 V 曲線より内側の断熱ポテンシャルはケプラー運動をしている電子が感じるポテンシャル、一方で、 V 曲線より外側の断熱ポテンシャルは、原点から離れた z 平面上でサイクロトン運動をする電子が感じるポテンシャルを表していると考えられる。

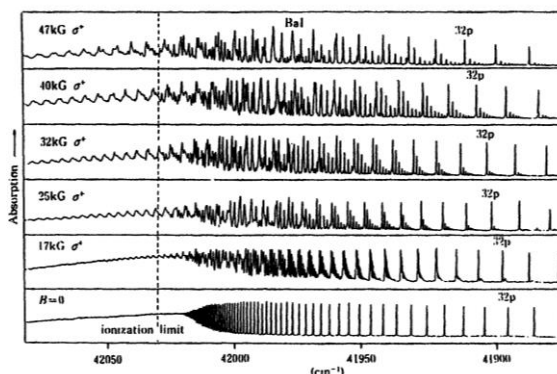


図 1：電離しきい近傍のバリウム原子の光吸収スペクトルの磁場強度依存性[1]。磁場強度の増加に伴い、磁場誘起遷移による吸収線と、準ランダウ共鳴構造が観測される。

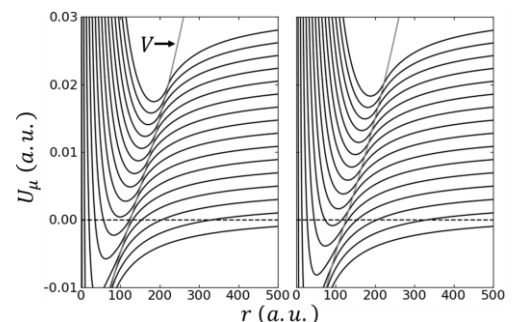


図 2：断熱ポテンシャルエネルギー U_μ ($m = 0$, $B_z = 470$ T)と $z = 0$ 平面上的古典ポテンシャル $V(\rho = r)$ 。偶パリティ(左)、奇パリティ(右)のそれぞれについて最低から 16 番目迄を表示。 $l = 300$ 迄の球面調和関数で展開。

[1] K. T. Lu, F. S. Tomkins, and W.R.S. Garton, 1978, Proc. Roy. Soc. London. 362, 421.

[2] H. Hasegawa et al., 1989, Progress of Theoretical Physics Supplement 98, 198.