

「原子衝突のキーワード」

ブライト相互作用(Breit interaction)

2 つの流れる電子の間には磁気相互作用がはたらく。電子の流れの間に生じる磁気相互作用のエネルギーは、電子の速度が増すほど大きくなる。これはまさに古典電磁気学で、電流から生じるベクトルポテンシャルと、別の電流ベクトルの内積として表されるものである。したがってその大きさは、クーロン相互作用に対して、電子の速度の期待値 v と光の速度 c の比の平方 $(v/c)^2$ 、すなわち原子に束縛されている電子であれば、原子番号 Z と微細構造定数 $\alpha (\cong 1/137)$ の積の平方 $(Z\alpha)^2$ 程度になる。量子論的には、これに加えて、同程度の大きさで、電子固有のスピンによる磁気相互作用も生じる。以上の相互作用は、提案者 G. Breit の名字を取ってブライト相互作用と呼ばれる [1]。

量子電磁力学の枠組みでは、電子間相互作用は仮想光子の伝播を介して記述されるが、1 個の仮想光子のやり取りに伴ってクーロン相互作用と磁気相互作用が現れる。具体的に書くと、2 つの電子がやり取りする周波数 ω の 1 個の仮想光子の波動関数に対してクーロン・ゲージをとった場合には、距離 r だけ離れた電子間の磁気相互作用エネルギー U は原子単位系で次のように表せる。

$$U(r)$$

$$= -\vec{\alpha}_1 \cdot \vec{\alpha}_2 \frac{e^{i\omega r/c}}{r} + (\vec{\alpha}_1 \cdot \vec{v}_1)(\vec{\alpha}_2 \cdot \vec{v}_2) \frac{e^{i\omega r/c} - 1}{\omega^2 r/c^2}$$

ここで、 $\vec{\alpha}$ はディラックの 4×4 行列で、パウリ行列 $\vec{\sigma}$ を使って次のように書ける。

$$\vec{\alpha} = \begin{bmatrix} 0 & \vec{\sigma} \\ \vec{\sigma} & 0 \end{bmatrix}$$

$\vec{\alpha}$ 行列は期待値 v/c を与える速度演算子なので、磁気相互作用エネルギーの大きさは $(v/c)^2$ 程度であることが式から直ちに分かる。この磁気相互作用エネルギーは、仮想光子の波動関数の横成分(伝播方向と直交する成分)から生じるもので、有限の速度で仮想光子が伝播する時間 $\tau = r/c$ だけの遅延効果を指数関数が表している。例えば、仮想光子が 1 Å 程度離れた電子の間を飛び移る時間に、指数関数の位相が $\pi/2$ だけ変化するには、高エネルギーの X 線の周波数 (10^{18} Hz 以上)が必要である。軽元素原子では、電子間の

相互作用により生じる電子遷移に伴ってやり取りされる仮想光子の周波数はそれよりずっと小さい。その場合には、指数関数を $1/c (= \alpha)$ の冪で展開し、低次の項だけを考えればよい。磁気相互作用エネルギーを α の二次の項までで整理すると、仮想光子の周波数に依存する項が陽に現れず、次式のようになる。

$$U_B(r) = -\frac{\vec{\alpha}_1 \cdot \vec{\alpha}_2}{r} + \frac{\vec{\alpha}_1 \cdot \vec{\alpha}_2 - (\vec{\alpha}_1 \cdot \hat{r})(\vec{\alpha}_2 \cdot \hat{r})}{2r}$$

ここで、 $\hat{r}$ は単位ベクトル $\vec{r}/r$ である。これが、いわゆるブライト相互作用エネルギーである。第一項は磁気相互作用エネルギーの静的な成分、第二項は指数関数を冪展開したときの二次の項から生じるもので、遅延効果の成分を表している。これに対して、周波数依存性を陽に含む磁気相互作用エネルギー U は、一般化ブライト相互作用エネルギーと呼ばれている。最近、重元素多価イオンによる高エネルギー電子の二電子性捕獲過程において、顕著な遅延効果が実験的に観測されている [2]。

ブライト相互作用エネルギー U_B は、その非相対論的近似(パウリ近似と呼ばれる)において、電子間の軌道-軌道、スピン-軌道、スピン-スピン相互作用の成分に分けて表すことができる。軌道-軌道相互作用はクーロン相互作用と同じような長距離相互作用(r^{-1} に比例)である。一方、スピン-軌道(r^{-3} に比例)とスピン-スピン相互作用(r^{-3} に比例する成分と、接触型 $\delta(r)$ の成分をもつ)は短距離相互作用であり、多重項準位の微細構造分裂に寄与する。このうちスピン-軌道相互作用の効果によって、ヘリウム原子の三重項 2^3P の微細構造準位が逆転する($J = 2, 1, 0$ の順に高くなる)ことが知られている [3]。

(核融合研 加藤太治)

参考文献

- [1] G. Breit, Phys. Rev. **34**, 553 (1929).
- [2] N. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 073203 (2008).
- [3] H.A. Bethe, and E.E. Salpeter, *Quantum Mechanics of One- and Two-Electron Atoms* (Springer-Verlag, Berlin, Cöttingen, Heidelberg, 1957) Sect. 40.