

寺田寅彦と原子核物理学－原子核の α 粒子モデルの源流－

岩崎 正春

寺田寅彦（以後寅彦と略す）と原子核物理学との組み合わせは一見奇異に思われるかもしれない。なぜなら寅彦は地球物理学や古典物理学を主として研究してきたからである。もっとも一時期において当時の最先端分野である「X線結晶学」の初期開拓者として名を残しているが、その後は気象をはじめとする古典物理学に戻っている。ところが寅彦の研究論文を調べていくと、X線以外にも当時の最先端分野の研究に興味をもっていたことがわかった。その一つが原子核物理学（当時は原子物理学）に関する研究である。この稿ではその内容について概要を述べるとともに、寅彦の知られざる一面も紹介したい。

まず本論に入る前に寅彦の生きた時代、20世紀初頭の物理学の状況について触れておきたい。当時は文字通りまれにみる物理学の大変革の時期を迎えようとしていた。物質の極微の構造が「原子・分子で構成されている」ことがしだいに明らかになりつつあった。ところが原子・分子の運動は当時の物理学（古典物理学）の法則では全く説明できなかった。つまり新たな物理法則を模索している過渡期に当たっていた。この状況は1925年に量子力学が誕生するまで続いた。この大変革期に寅彦はヨーロッパ（ドイツ、フランスおよびイギリス）に留学する。当時の出来事を時系列でまとめると次のようになる。

	世界の出来事	寅彦の出来事（原子物理関係）
1895年	X線の発見	
1899年	ウランからの α 、 β 線の発見	
1904年	原子の土星型モデル（長岡）	
1909年		ヨーロッパ留学（1909～1911年）
1912年	結晶によるX線回折（ラウエ）	
1913年	X線結晶学（ブラッグ父子） 原子モデル（ボーア）	X線結晶学（寅彦）
1919年		放射性原子核のモデル
1925年	量子力学の成立	
1928年	α 崩壊の理論（ガモフ）	
1932年	中性子の発見と核構造論	

ここで注目すべきは、寅彦のヨーロッパ留学がまさに物理学界の大変革期の真ただ中に当たっていることである。しかも行った先はその中心地だったわけである。約2年間の留学を終えた寅彦の研究の興味は当然ながら原子物理学に移った。ラウエのX線回折に刺激を受け、みずから当時の貧弱な実験設備にもかかわらず、ブラッグ父子とは独立にX線回折の実験及び理論を成し遂げたことはよく知られている。その後、寅彦の研究分野は再び以前の地球物理学や古典物理学に戻るのだが、最近偶然にも原子よりもさらに小さい原子核に関する寅彦の論文があることを知り驚いた。それは上の表の1919年の放射性原子核の単著論文である。タイトルは、

ON A MODEL OF RADIOACTIVE ATOMS.

[*Proc. Phys.-Math. Soc. Japan*, I, pp. 185-195, 1919.]

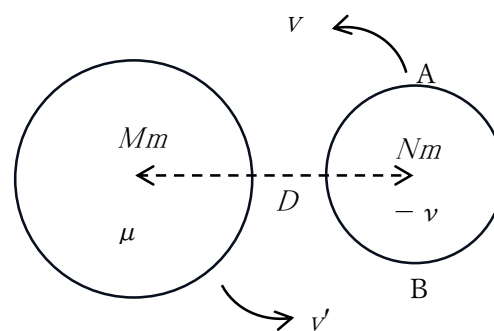
である。“ATOM”となっているが取り扱っているのは α 崩壊する原子核であり、それを含む原子の構造が主なテーマとなっている。当時、寅彦のいた東京帝国大学には土星型原子モデルで有名な長岡半太郎が教授として在職していたのであるから寅彦が原子核に興味をもったのはある意味当然だったのかもしれない。(不思議なことにこの論文には長岡半太郎の名前は出てこない。)ここでは数式を使わず、物理的な考え方を中心に論文の概略を紹介する。

当時の原子構造についての主要な情報源は原子から自然放出される粒子や輻射(電磁波)であった。それらは α 線、 β 線、 γ 線と名付けられ、その実体もほぼわかっていた。 α 線はヘリウムイオン(電荷 $+2e$)、 β 線は電子(電荷 $-e$)、 γ 線は電磁波(電荷なし)であることが実験的に明らかになっていった。寅彦がこの論文で取り上げたのは α 粒子を放出する α 崩壊であった。また、 α 崩壊する元素は系列をつくることが知られていた。つまり元素 X_1 が α 崩壊して別の元素 X_2 になり、元素 X_2 も α 崩壊して別の元素 X_3 になり…、というように α 崩壊を何度か繰り返し最後に安定な元素 X になる。当時すでにトリウム系列、ウラン系列、アクチニウム系列が知られていた。

前置きはこのぐらいにしてさっそく寅彦の論文を読んでいこう。通常原子モデルは正電気を帯びた原子核(Nucleus)の周りを電子がリング状に並んだ長岡モデルがよく知られていた。

しかし不安定な放射性原子のモデルとして、寅彦は大小2つの原子核が結合してお互いに全体の重心の周りをまわっている図のようなモデルを考えた。

(図は論文には描かれていないが、わかりやすくするため付け加えた。)

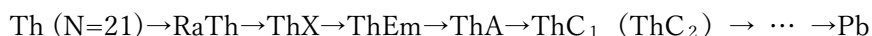


ここで m は α 粒子の質量を表し、大きいほうの原子核（主核と呼ぶ）の質量は Mm 、小さいほうの原子核（副核と呼ぶ）の質量は Nm とする。2つの整数 M, N は $M > N$ とする。つまり各部分は M 個の α 粒子および N 個の α 粒子からそれぞれ構成されている。また、それらの電荷は μ および $-\nu$ （電荷量 e を単位として）であると仮定する。ただし、 μ, ν は正整数とする。 α 粒子の電荷が $+2$ であることを考慮すると、正に帯電した主核は $(2M - \mu)$ 個の電子を、負に帯電した副核は $(2N + \nu)$ 個の電子を含むことになる。また、残りの核の周りを廻っている電子（Ring electrons）については簡単のため考えないものとする。論文全体を通して電子は非常に軽いので電荷の担い手としてのみ考え、その運動については無視している。

つぎにこの力学系の運動を考えるのであるが、とりあえず古典力学を用いて考えてみる。クーロン斥力のため α 粒子の集合体などはないが、ここでは未知の力が働いて結合していると仮定する。2つの核は距離 D だけ離れてクーロン引力により重心の周りをそれぞれ速度 v, v' で円運動しているとする（図を参照）。このとき両者の間には万有引力も同時に働いているが、文字通り桁違いに小さいので無視できる。円運動については、運動方程式と量子条件を連立させて解く。量子条件として系全体の角運動量を $(M+N) h/2\pi$ と仮定する（ h はプランク定数）。つまり α 粒子の角運動量を $h/2\pi$ としている。この辺りの記述は前期量子論の時代であるから不定性が残る。

個々の原子核の内部の運動について、寅彦は万有引力に基づく潮汐力（Tidal force）とのアナロジーを考える。この力学系を地球と月の関係に見立てる。（こういう記述は論文にはない。筆者の想像である。）力はともに逆2乗力だからこのアナロジーは理解できる。ただし、引力だけの万有引力に比して、クーロン力は引力と斥力の両方をもつことに注意する必要がある。副核をプラス電荷の α 粒子の海とみなすと、主核（正電荷）からの潮汐力は地球の場合と逆になる。つまり図の A、B を含む大円の周上の地点（満潮の地点に対応）で外向きの潮汐力が働くから、 α 粒子は副核とほぼ同じ速度 v で放出されると考える。潮汐力の大きさは主核から副核へ及ぼすほうが大きいので、 α 粒子は副核から放出される。この辺りは寅彦の地球物理的感覚が生かされている。 α 粒子の放出 ($N \rightarrow N-1$) に際して同時に β 崩壊も起こる。上記の連立方程式を数値的に解いて、このとき核の電荷 μ および ν は変化しないこと、また距離 D は減少し速度 v は増加することを示している。

引き続き崩壊系列についての議論に移ろう。系列内の他の α 崩壊も上記と同じメカニズムで起こり、ある所で副核は主核に吸収され一つの安定な原子核になる。例えばトリウム系列を例にとると（当時の元素記号を用いて）



となる。ここで当時、経験的によく知られていたガイガー-ヌッタール（Geiger-Nuttall）の法則に着目する。すなわち「同じ系列内において α 崩壊の起こりやすさは放出された α 粒子のエネルギー（速度）

とともに大きくなる」というものである（実際の法則は数式で書かれているが省略）。これを寅彦のモデルで言い換えると、 D が小さいほど（潮汐力は大きくなるので） α 崩壊は起こり易くなり、放出される α 粒子の速度 v も大きくなる。つまり、ガイガー-ヌッタールの法則と定性的に一致する結果が得られる。その他の系列についても論文では同様な議論をしているが割愛する。いずれにせよ当時の僅かな情報に基づき、古典力学と前期量子論を巧みに用いて α 崩壊に迫っている。しかしながら数年後の量子力学の登場により、古典力学を用いた寅彦の論文は忘れ去られた。

以上が寅彦の論文の概要であるが、その後の α 崩壊に関する研究の発展について触れておく。やはり画期的転換点は1925年の量子力学の完成であろう。これによってわれわれは原子、原子核の極微の世界の物理法則を手に入れたことになる。これを受けて1928年、ガモフ等により量子力学を用いた満足な α 崩壊の理論が誕生した。それによると原子核は球形であり、その中に存在する一つの α 粒子は周囲の正電荷の高い平均ポテンシャルの壁に閉じ込められ核外に脱出できない。しかし量子力学の法則では α 粒子は確率波の性質をもつからポテンシャルの壁の外側に抜け出す確率をもつことができる。いわゆる量子力学特有のトンネル効果である。これにより α 崩壊は定量的にも満足に理解できるようになった。また1932年には中性子が発見され、原子核は陽子（水素の原子核）と中性子の集合体であるという今日われわれが知っている原子核像が確立した。最後に残された課題「プラス電荷だけの原子核がなぜ結合しているか」は湯川による核力（中間子論）の導入により解決された。

寅彦の論文は新しい物理法則がまだ確立していないという過渡的な時代の中で、当時の最先端の研究テーマである α 崩壊を何とか理解しようとチャレンジした試みであった。その心意気は論文中の次の言葉によく表れている。

“The present trial, though still unsatisfactory, may at least suggest a number of problems for experiments and open a new field of theoretical investigations.”

この言葉の中に、我々は今までと違った寅彦の一面を読み取ることができる。

最後に、寅彦が切り開いた新しい分野から生まれた2つの概念を指摘して本論を締めくくろう。一つは原子核を2原子分子的にみる見方であり、例えば1938年に発見された核分裂現象に通じるものである。残念ながらこの時すでに寅彦は亡くなっていたが、当時の人々は核が2つに分かれるという発想にはなかなか及ばなかったようである。他の一つは戦後、主に日本の核理論研究グループが展開した「原子核の α 粒子モデル」である。 α 粒子は核力により特に安定な粒子であることがわかり、軽い原子核(Be, C, O, Neなど)は α 粒子の集まりとして記述できることが明らかになった。さらに励起状態までも説明されることがわかり軽い原子核のモデルとして確立した。寅彦の放射性原子核のモデルはその先駆けともいえるものである。