

スピンと歳差運動の宇宙ゴマを使った学習

高嶋隆一

京都教育大学 理学科 takasima@kyokyo-u.ac.jp

キーワード：スピン、歳差運動、宇宙ゴマ

(受付け：1999 年 5 月 6 日)

I. はじめに

力学の教材として歳差運動を取り扱う時、もっとも便利なものが宇宙ゴマである。これを手にとって回転の軸が横向きになるように支えると、重力場の中におかれた宇宙ゴマに歳差運動の力が働いていることを感じることができる。歳差運動は角運動量を持ったものの回転軸を回そうとすると、かけた力と直角の方向に回転軸が動き出す現象である。

化学を学ぶと周期律表というものがあって、8 個の原子番号の周期が 2 回現れる。これは電子状態が s 状態が 1 個と p 状態が 3 個あるが、スピンが上向きと下向きあるので 8 個の電子の状態があると習う。電荷を持った電子が回っているので、電子自身が小さな磁石となる。これが同じ向きを持つと磁石となっていて、ろんなところに利用されているわけである。

II. 歳差運動の力学

角運動量 L を持つ回転体の運動方程式は $dL/dt = \Sigma r \times F$ である。この式の意味は、力のモーメントをかけると回転体の角運動量に変化するということである。言い替えると、コマに巻き付けた紐を引っ張るとコマは回り出すということになる。以下の図にコマの回る向きと歳差運動の向きを示す。角運動量の向きと支点

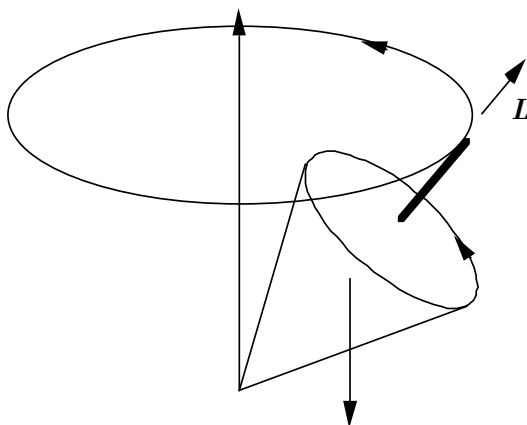


図1 こまの歳差運動 こまの回し方で歳差運動の向きが決まる。

から重心に向かうベクトルは向きが同じになる。

電子は固有の角運動量に比例する磁気モーメント μ を持つ。古典力学で磁束密度 B の中におかれた電子の運動を取り扱うと、回転体の運動方程式を使うことになる。磁気モーメントは離れたところにおかれた磁気単磁極があることと等価であると仮定して、これに働く力を考えると方程式は $d\mathbf{L}/dt = \mu \times \mathbf{B}$ となる。 $\mu = \gamma \mathbf{L}$ と書くと、方程式は $d\mathbf{L}/dt = \gamma \mathbf{L} \times \mathbf{B}$ となり、角運動量ベクトルは磁束密度 B のまわりを回転することが明らかになる。(小谷、梅沢)

この方程式は、ブーメランが戻ってくることを説明することにも使えるし、コマの歳差運動を説明することにも使える。確かに方程式はこうなるが、どうも納得がいけないという人のために宇宙ゴマが登場する。宇宙ゴマを回転させた後手に持って、回転軸を横に倒してみると歳差運動の力を感じることができる。これは角運動量を簡単に変えることはできないことの現れと取ることもできる。かかっている力に対して横向きに力が生まれることが実に面白い。

宇宙ゴマ、声変わり君、水飲み鳥はお祭りの香具師で売っている物理の三大教材ともいえる。これらは京都駅の地下街などにある「王様のアイデア」という店でも売っているということである。

III. スピンと量子力学

量子力学の講義を行なっていると、スピンが出てくるあたりで難しく感じるようである。波動力学のあたりでは、電子が光のような波の性質があると無理矢理考えるということではなんとか納得する。ところが、電子のスピンをスピノルの 2 行 1 列の行列で表現するとなると、何のためにこんなものが出てくるのかわからなくなる。このスピノルは上向きの状態の割合とした向きの割合を示していると説明されるが、スピンの方向がどこを向いているのかを表現することにも使える。磁場との相互作用を入れて、方程式を解くと、古典力学と同じように歳差運動を行なうことを導くことができる。(原)

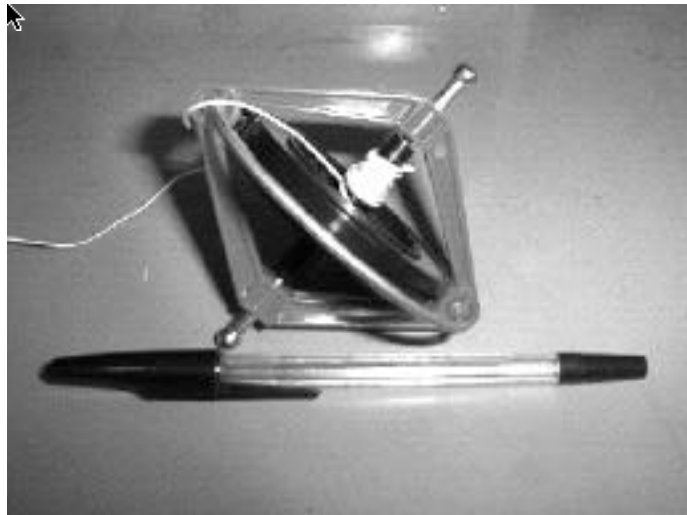


図2 宇宙ゴマ

量子力学は古典的な力学法則が記述することと別のやり方で記述し、古典力学が記述できない離散的な状態を記述することができる。離散的な状態はマクロな世界では見ることはできないので我々の直観が働かなくなり、難しいと感じることになる。歳差運動の例を示すことによって、少しでも量子力学の記述方法に親しみが持てるようにしたいものである。

また、磁気モーメントを持った電子や陽子が歳差運動をおこなうと、磁力線をゆすることになりその周波数の電波が出てくる。この現象は磁気共鳴現象として知られている。電波の水素原子核による共鳴現象を使って、人体の臓器に現れた腫瘍などが検査できる。

このスピンという性質によって、炭素は他の 4 つの原子と結び付くことができるようになる。生命体の多様性と規則性はこの量子力学的な性質に基づいている。生命体はアボガドロ数に相当する個数のさまざまな物質を代謝するが、アボガドロ数個もあるそれぞれの物質は全く同じものである。

IV. おわりに

歳差運動が面白いのは力をかけた方向と直角な方向に別の力が働くことである。しかも回っているコマが歳差運動をはじめると、摩擦がなければ永久に歳差運動し続けるはずである。磁力でコマをうかす U-CUS という玩具がある。原理的には台とこまに、磁石が反発するように埋め込んだものである。これなどは歳差運動が始まるとすぐ落ちてしまうがこれは、磁石の力がうまく作用しなくなるからであろう。電子や陽子の場合は電磁放射をすることによってエネルギーを失って、スピンの向きが変わっていく。

万有引力によって地球が太陽に落ちていかないのも、太陽系が銀河中心に落ちていかないのも、角運動量を地球や太陽系が持っているからと考えることができる。宇宙ができる時に物質をかき混ぜたのはどういう力が働いてのことなのだろうか。

大学院で研究生活をはじめた時、研究室はスピンの物理を中心に取り組んでいた。スピン現象は難しく面白いものである。こどものとき宇宙ゴマを買っていたらもう少し良いスピンの研究ができたかも知れない。ともあれ、重陽子というものがあるおかげで太陽が燃えることができる。またパイ中間子はクォークのスピンが逆なので強く結合し、軽いパイ中間子を交換することによって原子核が結合する。これはクォークを結合させる力がグルーオンであることがわかった今となっても変わらぬ真実である。

文献

小谷正雄、梅沢博臣編 1976. 大学演習 量子力学、裳華房、191
原康夫 1994. 岩波基礎物理シリーズ 量子力学、岩波書店、150