

第一章 背景知識

本章所述各節，為瞭解半導體理論重要背景知識，亦有助於瞭解本書第二章以後微影、圖罩、阻劑與電漿等相關內容。在此特為化學、化工等非電子、電機系所就讀或畢業之讀者，以較簡明之方式說明。欲深入瞭解，須參看量子化學、光學、固態電子、固態物理、半導體元件與物理、電子材料等相關專業書籍。

1-1 電子自旋、角動量與磁矩

1-1-1 電子自旋

電子是否有自旋(Spin)? 是否可以實驗證明? 如有自旋，為何自旋? 此三問題仍為量子力學未解之謎，或迷思(Myth)，實不易明確說明。

西元 1921 年，施特恩-蓋拉賀(Stern-Gerlach)二人，以銀(Ag)原子通過真空中之磁場，底片顯影後發現並非單一線，而為分裂之二條線，證明原子有磁矩，否則不會受磁場作用。二人並推論原子之磁矩、角動量等在電場或磁場中，不能任意取向，只能取一定之數個方向或角度，此稱為空間取向量子化(Space Orientation Quantization)。現在已知為銀之外層電子($5s^1$)之自旋所導致。

西元 1925 年，烏倫貝克-戈斯米特(Uhlenbeck-Goudsmit)二荷蘭人，當時仍為研究生，為說明鹼金屬原子（如鈉、鉀）光譜之精細結構，首先提出電子除在軌道(Orbital)運動外，尚有固定之「自旋」，且每個電子皆相同，與軌道無關。烏告訴戈（荷蘭文翻譯為英文）：It means that there is a fourth degree of freedom for the electron. The electron has spin, that it rotates.

電子前三個自由度為主量子數 n 、軌域量子數 l 、磁量子數 m ，自旋為第四個自由度。此人為假設之概念，雖與真實情況可能有別，但在一般情況下，已可合理解釋眾多光譜線分裂之實驗事實與眾多量子現象。分子中之電子如僅單方向自旋，會形成磁矩，違反大多數物質無磁性之原則，又將受原子核正電荷之吸引，最終被吸入原子核，故假設電子有特定之軌域，又可產生反向自旋，構成平衡穩定狀態。軌域如 s 、 p 、 d 、 f ，各具特定之形狀，此形狀可視為電子存在之機率分佈，故有軌域而無軌道。帶電粒子在三維空間中自旋，即可產生自旋角動量。

2 半導體微影技術

已知球形帶電粒子自旋，產生自旋角動量與磁矩。已證實電子亦具角動量與磁矩，且為內稟（稟音丙）(Intrinsic)性質，不需任何外力即具有，故反推電子可能有自旋，「電子自旋」此名詞於焉誕生。不少科技人傾向以一粒沙看一世界之思維，認定巨觀與微觀世界之間有巧妙相等性。已知地球偏軸自旋，並繞太陽公轉，此為巨觀；電子如地球，原子如太陽，此為微觀。大千世界之造物者，不管是我國神話之盤古、女媧（媧音挖），或外國宗教之神話人物，無可否認，造物者將大千世界建造得非常奧妙，遠超過人類之智慧。

電子是否真有自旋，據本書作者之瞭解，目前尚無法以實驗證明（此點敬請專家指教）。已知地球有固定之軌道，電子則有軌域，而非軌道，電子如地球之微觀相等性並無法成立。

在外加磁力線 B 影響下，電子之內稟自旋角動量 S (Intrinsic Spin Angular Momentum) 產生偏旋(Precession)，在 z 方向（外加磁力線 B 方向）之空間取向呈現量子化，有二方向相反之分向量 S_z 。由下二式

$$\text{圓球剛體自旋：角動量向量 } \vec{L} = \vec{r} \times \vec{P} = \vec{r} \times m \cdot \vec{v}$$

$$\text{電子自旋（比照圓球剛體自旋）：角動量向量 } \vec{S} = \vec{r} \times \vec{P} = \vec{r} \times m \cdot \vec{v}$$

根據叉積右手定則，右旋之角動量 S 向上， S_z 以(↑)代表，習稱旋上(Spin-up)，能量為 $+\frac{1}{2}\hbar$ 。左旋角動量 S 向下， S_z 以(↓)代表，習稱旋下(Spin-down)，能量為 $-\frac{1}{2}\hbar$ 。

請讀者特別注意，電子自旋量子數 $+1/2$ 與 $-1/2$ ，為能量 $+\frac{1}{2}\hbar$ 與 $-\frac{1}{2}\hbar$ 之簡示法。箭號(↑)(↓)其物理意義為「自旋角動量 S 在 z 方向之分向量 S_z 之方向」，而非自旋或內稟磁矩之方向。人為設定 z 方向與外加磁力線 B 同向。

1-1-2 磁矩

電子自旋又產生內稟磁矩(Intrinsic Magnetic Moment)，因電子之磁轉比(Gyromagnetic Ratio)為負值，磁矩與角動量同軸但反向。如磁矩與外加磁力線順向，能量較低；如逆向相抗，則能量較高，能量差視外加磁場之強度而定，實用之分析技術一般在微波(>1 GHz)範圍。

當電子之 S_z 為(↓)（左旋、旋下、 $-1/2$ ）時，內稟磁矩為(↑)，與 B (↑)順向，為低能態； S_z 為(↑)（右旋、旋上、 $+1/2$ ）之內稟磁矩為(↓)，與 B (↑)反向，為高能態。

請注意，原子為帶正電球體，可有自旋，無庸置疑，其磁轉比為正值，磁矩方向與

角動量同軸且同向，與電子相反。原子之自旋與磁矩並非內稟，而為外稟(Extrinsic)性質，即在外力影響下，可使原子之自旋與磁矩消失。

自由電子之自旋內稟磁矩 \vec{U}_{spin} 如下：

$$\vec{U}_{\text{spin}} = \frac{e}{2m_e} \mathbf{g} \cdot \vec{S} = \frac{e}{2m_e} 2 \cdot \frac{\hbar}{2} = \frac{e\hbar}{2m_e} = \vec{U}_B$$

上式以分裂因子 $g=2.0$ ，角動量空間取向 \vec{S} 取 $\vec{S}_z = \frac{1}{2}\hbar$ 代入，又 e 為電子電荷， m_e 為電子質量， $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ， h 為浦郎克常數。 \vec{U}_B 為波爾磁子(Bohr Magneton)，磁矩之基本單位。

$$\begin{aligned} \vec{U}_B &= \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \text{Coul} \cdot 6.62 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{sec}}{2 \cdot 9.1 \cdot 10^{-31} \text{kg} \cdot 2 \cdot \pi} = 9.27 \cdot 10^{-24} \text{J/Tesla} \\ &= 9.27 \cdot 10^{-21} \text{erg/Gauss} \end{aligned}$$

單位驗證：

1. 角D動量L或S單位為 h 。

$$L = rP = rmv = g \text{ cm}^2/\text{sec} \quad h = \text{erg sec} = \text{f d sec} = (\text{ma})\text{d sec} = g \text{ cm}^2/\text{sec} \quad L = h$$

2. 磁矩單位為J/T或erg/G。

已知電荷單位為庫侖(Coul) = A sec。1公尺(M)導線，通過1安培(A)電流，使引發1牛頓(N)作用力所需之磁通密度，即為1特士拉(Tesla) T。1特士拉 = 10,000高斯(Gauss) G。1 T = 10^4 G。地球表面 ~ 0.5 G。

$$\begin{aligned} T &= \frac{N}{A \cdot M} = \frac{\text{kg} \frac{M}{\text{sec}^2}}{A \cdot M} = \frac{\text{kg}}{A \cdot \text{sec}^2} \\ \vec{U}_B &= \frac{\text{Coul} \cdot \text{J} \cdot \text{sec}}{\text{kg}} = \frac{A \cdot \text{sec} \cdot \text{J} \cdot \text{sec}}{\text{kg}} = \frac{A \cdot \text{sec}^2 \cdot \text{J}}{\text{kg}} = \frac{\text{J}}{\text{T}} = 10^3 \frac{\text{erg}}{\text{G}} \end{aligned}$$

補充：

1. 電子分裂因子 g 值有四類，a.自由電子自旋 g_{fs} ，b.自由電子沿磁力線迴轉 g_{fc} ，c.軌域電子自旋 g_{os} ，d.軌域電子迴轉 g_{oc} 。

(f：自由 free，s：自旋 spin，c：迴轉 cyclotron，o：軌域 orbital)

2. 自由電子自旋之精密 g 值， $g_{fs} = 2.002319304386$ 。故自由電子之自旋內稟磁矩略大於波爾磁子($g=2.0$)。

3. 軌域電子自旋之 $g_{os} \sim 2$ ，與自由電子(無軌域)之自旋 g_{fs} 略有差異。

4. 電子在軌域迴轉(此迴轉為假設)，亦滋生磁矩， $g_{oc} = (g\ell) \sim 1.0$ 。但注意，底態(Ground State) s軌域電子， $g_{oc} = 0$ ，無磁矩；發態(Excited State) s軌域電子， $g_{oc} \sim 1.0$ 。其他軌域如 p, d, f軌域電子， $g_{oc} \sim 1.0$ 。

★ 4 半導體微影技術

5. 原子亦有自旋，但磁矩甚小。磁矩 $U \propto \frac{e}{m}$ ， U 正比於電荷／質量比。以氫原子(H)為例，質量 $m_H \gg m_e$ ，故氫原子自旋磁矩 \ll 電子。

6. 氫原子總磁矩=軌域電子自旋+軌域電子迴轉(底態=0，發態>0)+氫原子自旋。

1-1-3 電子自旋假設之原因與矛盾

A. 原因

已知球形帶電粒子自旋滋生磁矩。已證實電子亦具磁矩，故反推電子具自旋。此為最接近巨觀現實之微觀假設，可合理解釋光譜線分裂與眾多量子現象。

B. 矛盾

1. 電子為無限小之質點，幾無體積與尺寸，與光子相同，呈現波與粒子之二重性，並非球體。

2. 自旋帶電球體滋生角動量與磁矩，自旋停止，角動量與磁矩亦消失。電子之角動量與磁矩永遠存在，不需任何外力即具有，不論是氫分子之電子、矽晶圓矽之電子、同步輻射儲存環中之電子，或電子束微影機台中之電子，皆具有角動量與磁矩，故屬於內稟性質，且在外加磁場影響下，角動量與磁矩空間取向呈量子化。電子為自旋球體有難解之處。

3. 根據已測知電子之內稟磁矩， -9.21×10^{-21} erg/gauss，推算電子自旋角速度 $\omega > 10^{32}$ rad/s， $\omega = 2\pi f$ ，轉速 $f > 1.6 \times 10^{31}$ rev/s (轉／秒)，轉速實在太高，如認定電子真有自旋，有矛盾難解之處。

C. 結論

電子運動本質為量子力學迄今未解之謎。建議一般讀者，認知「電子自旋」為西元1925年，烏-戈二氏為方便解釋光譜線而提出之推論，並非實驗證明。如原子筆(滾珠筆)、鉛筆(石墨筆)等名詞，僅為一時方便而取。一般讀者無妨將電子自旋直接視為角動量。對深入鑽研讀者，可以近代物理較嚴謹之概念審視，電子自旋為波函數(Wave Function)對稱性所造成之一項物理量，為量子力學特有之自由度，此自由度為能量狀態(Energy State)或量子狀態(Quantum State)。

科舉演變至清朝，各省舉人進京參加禮部會試，上榜者稱為貢士，再經皇帝殿試，取一甲三人，即狀元、榜眼、探花，賜「進士及第」；取二甲約七人，賜「進士出身」；取三甲約百餘人，賜「同進士出身」。皇帝常賜無科舉功名之大臣三甲「同進士出身」，以示皇恩浩蕩。

本書作者淺見，早期之烏—戈二氏，賜電子「一甲自旋及第」。近代科技更昌明後，已探知並不適當，但科學家仍賜電子「三甲同自旋出身」，因除此以外，別無更適當之賞賜。以形而上比喻，烏—戈二氏時代，看山是山，近代已看山不是山，層次提升。

D. 電子有趣之模型

文獻有帶電球體與空心圓環二模型。參看圖 1-1-1。

根據叉積(Cross Product)右手定則，帶電球體右旋，自旋角動量方向為大拇指方向，即朝上；左旋，自旋角動量方向朝下。

圖 1-1-1(a)電子磁共振原理圖，以五舞蹈少女表示，本書作者由英國 Bristol 大學化學系網站刊載之圖改繪。原圖為日本大阪大學宇宙地球科學專攻，池谷元何教授所繪。聲子(Phonon)通常以晶體震盪呈現。唱歌釋出能量表示此能量以晶體震盪，導致晶體發熱而釋出，為池谷教授幽默表達方式，並非真有歌聲傳出。圖 1-1-1(c)空心圓環模型，Bergman & Wesley 提出，原圖刊載 www.commonssensescience.org 網站。

註：

1. **Intrinsic** 此英文字含有內稟、固有、本徵、本質等義。**Intrinsic Wafer** 通常譯為本質晶圓，指未摻雜之矽晶圓，或裸矽(Bare Si)。**Intrinsic Viscosity** 通常譯為固有黏度。本書作者認為，**Intrinsic Spin Angular Momentum** 譯為內稟（稟音丙）自旋角動量，較能符合原意。

2. 英文 **Orbital**（軌道）此字，無法正確描述軌域之概念。中文「軌域」一詞，較合理且較正確。以波動方函數而言，文獻常見代表 s, p, d, f 軌域之圖形為電子出現機率達 95%之包線。

3. 質子（氫原子）之磁轉比為正值。質子自旋角動量方向與磁矩相同。

4. 為方便說明，本書假設電子為圓球體。另將旋、轉之定義予以區分，繞自軸曰旋，繞他軸曰轉。定義各名詞意義如下：

a. 自旋(Spin)：自旋軸=球體中心軸。

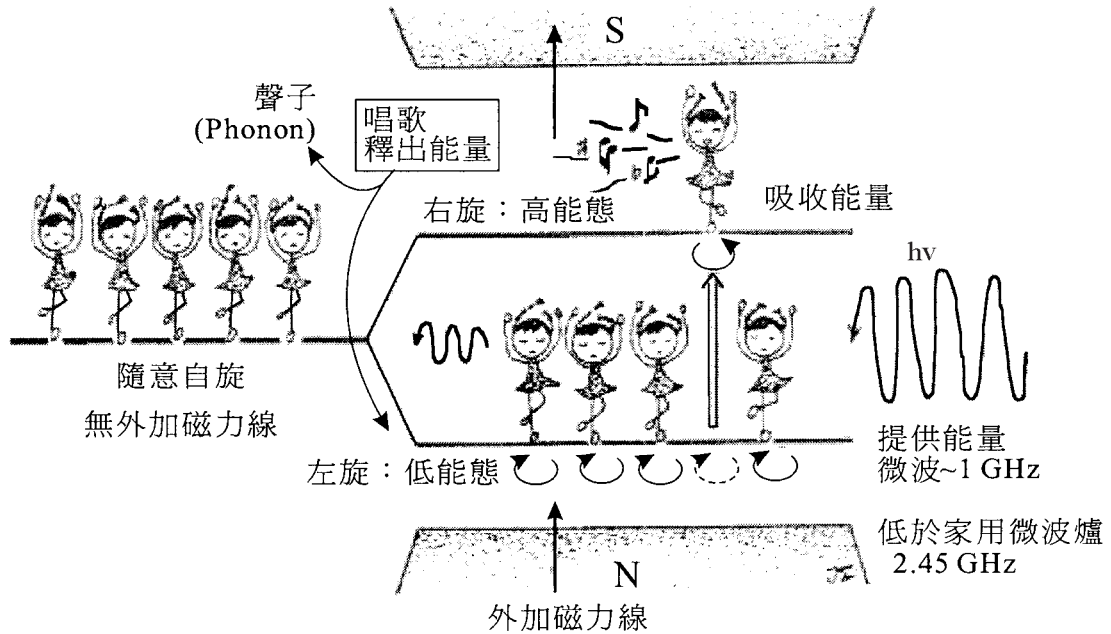
b. 偏旋(Precession)：偏軸自旋造成，自旋軸與偏旋軸夾角 >0 。夾角 $=0$ 時，自旋=偏旋。通常偏旋軸即為均勻磁場之磁力線。此字常見譯為「進動」，無旋、轉之意，不易瞭解。

c. 迴轉(Cyclotron, Rotate, Orbit)：如軌域電子之迴轉（此迴轉為假設）；如電子繞磁力線轉動，無固定不變之軌道。

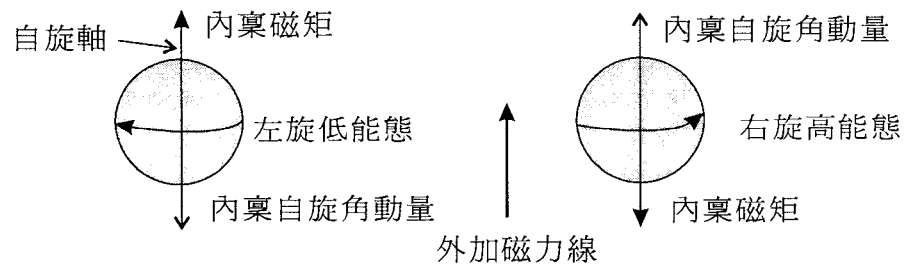
5. 聲子：光子頻率與其能量成正比，晶體振動(Crystal Vibration)亦與其能量成正

6 半導體微影技術

(a) 假設電子為自旋球體
電子磁共振(Electron Magnetic Resonance, EMR)原理



(b) 假設電子為自旋球體模型簡示圖



(c) 假設電子為自旋空心圓環模型簡示圖

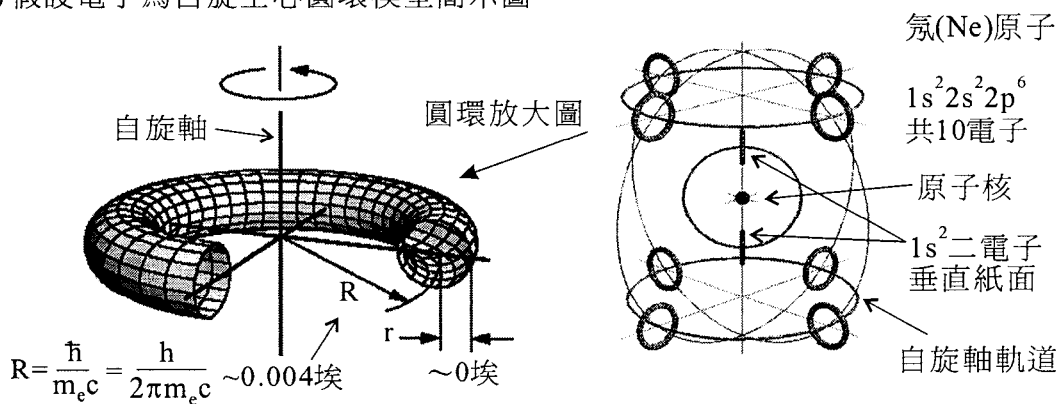


圖 1-1-1 (a)電子磁共振原理圖；(b)自旋球體模型；(c)空心圓環模型

比，比照光子，將晶體振動之因子，振子(Oscillator)視為粒子，因能量甚低， $\sim \text{meV}$ （毫電子伏特），可視為聲波範圍，故稱振子為聲子(Phonon)。晶體振動通常以縱波(Longitudinal Wave)或橫波(Transverse Wave)之平面波傳遞整個晶體，故聲子並非定域存在之粒子，其動量亦並非經典意義之實質動量，但具動量之特性，故稱之晶體動量(Crystal Momentum)。在聲學(Acoustics)上，聲波以聲子傳遞，如同光波（電磁波）以光子傳遞。光子與聲子皆屬於玻子(Boson)，不具守恆性質，可在碰撞時產生或消失。聲子可直接視為晶體振動，又可分為較高能態（較高頻）之光學(Optical)聲子，較低能態（較低頻）之聲學(Acoustic)聲子此二類。

$$\text{聲子能量為不連續量子能階，} E = (n + 0.5)h\nu = (n + 0.5)\hbar\omega \quad (\text{甲})$$

n 為 0, 1, 2...等含零整數， h 為浦郎克常數， $\hbar = h/2\pi$ ，角頻率 $\omega = 2\pi\nu$ ， ν 為線性振動頻率。

$$\text{紅外光譜振動能階，} E = (V + 0.5)h\nu \quad (\text{乙})$$

V 為 0, 1, 2...等含零整數，物理意義為振動量子數， $V = 0$ 為最低振動能階，此時 $E = 0.5h\nu$ （注意， $T > 0 \text{ K}$ 時， $V = 0$ ， $E \neq 0$ ）。

$$(\text{甲})(\text{乙}) \text{ 二式基本相同，相鄰二能階之能階差，} \Delta E = h\nu \quad (\text{丙})$$

$$1 \text{ eV} = 1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ Coul} \cdot \text{V} = 1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}, h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$\text{如 } E = 1 \text{ meV}, n = 1, \text{ 則 } \nu = E / (1 + 0.5)h$$

$$\text{則 } \nu = 10^{-3} \times 1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ J} / (1 + 0.5) \times 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 1.6 \times 10^{11} \text{ cycle/s}$$

$$= 160 \times 10^9 \text{ cycle/s} = 160 \text{ GHz (Giga Herz) (微波)}。$$

$$\text{如 } E = 1 \text{ meV}, n = 1000, \text{ 則 } \nu = 0.24 \text{ GHz} = 240 \text{ MHz (調頻無線電)}。$$

註：

1. 凡自旋量子數為半整數（ $1/2$ 奇數倍）之粒子，亦稱為費米子(Fermion)，為紀念義大利裔美國人費米(Fermi)而得。

2. 凡自旋量子數為整數（ $1/2$ 偶數倍）之粒子亦稱為玻子(Boson)，為紀念印度人玻思(Bose)而得。

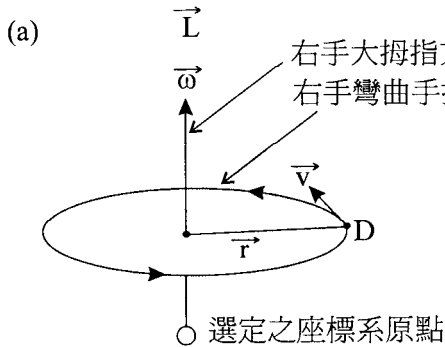
3. 基本粒子為複雜議題，簡言之，可分費米子與玻子二大類。

a. 費米子：含輕子(Lepton)（比質子輕）與重子(Baryon)（比質子重）。電子（自旋量子數 = $1/2$ ，質量 > 0 ）歸類為費米子中之輕子。

b. 玻子：含介子(Meson)、光子(Photon)、間子(Intermediate Boson)、重力子(Graviton)。光子與聲子（自旋量子數 = 1，質量 = 0）皆歸類為玻子。

c. 全部強作用(Strong Interaction)皆牽涉重子或介子，故重子與介子合稱強子(Hardon)。

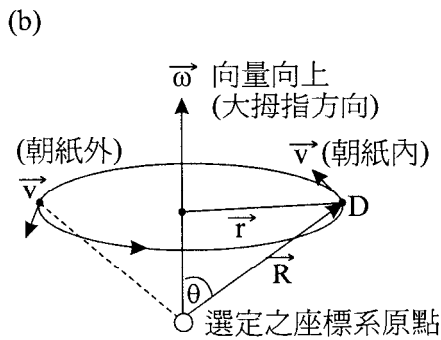
8 半導體微影技術



r : 圓盤剛體之半徑
 ω : 角速度(rad/sec)(角頻率, 迴轉頻率)
 v : D點線性速度
 f : 振盪頻率(cycle/s)
 m : 圓盤質量

$$\omega = 2\pi f = \frac{v}{r}$$

$$\text{叉積定義 } \mathbf{A} \times \mathbf{B} = \mathbf{n}_{\perp AB} AB \sin \theta_{AB, \min}$$



$\mathbf{n}_{\perp AB}$: 垂直於AB平面之單位向量 (右手定則大拇指方向)
 $\sin \theta_{AB, \min}$: AB間最小夾角之正弦函數

切線速度或線性速度 v 定義:

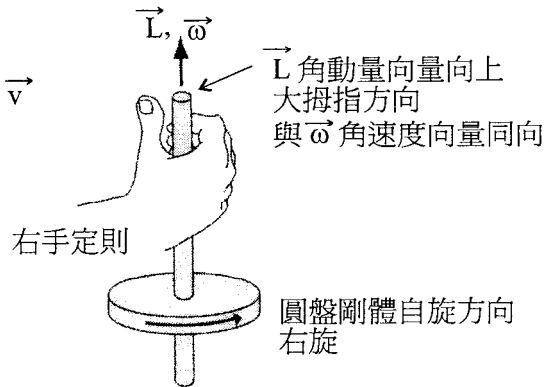
$$|v| = \omega r = \omega R \sin \theta$$

故 v 之向量可以叉積表示 $\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{R}$

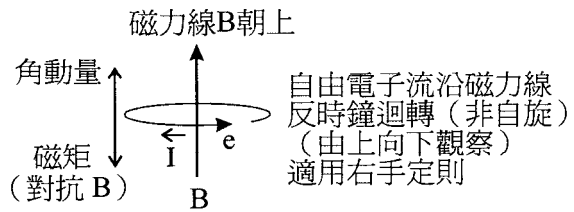
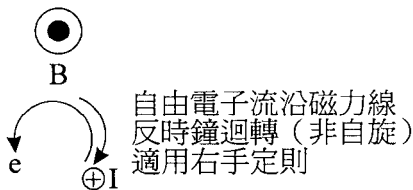
(c) 線性動量(Linear Momentum)向量 $\vec{P} = m \vec{v}$
 徑向量 \vec{r}
 角動量(Angular Momentum)向量 \vec{L}

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{P}$$

$$\vec{L} = \vec{r} \times m \vec{v}$$



(d) 磁力線B朝紙外 (對! 就是朝你啦!)



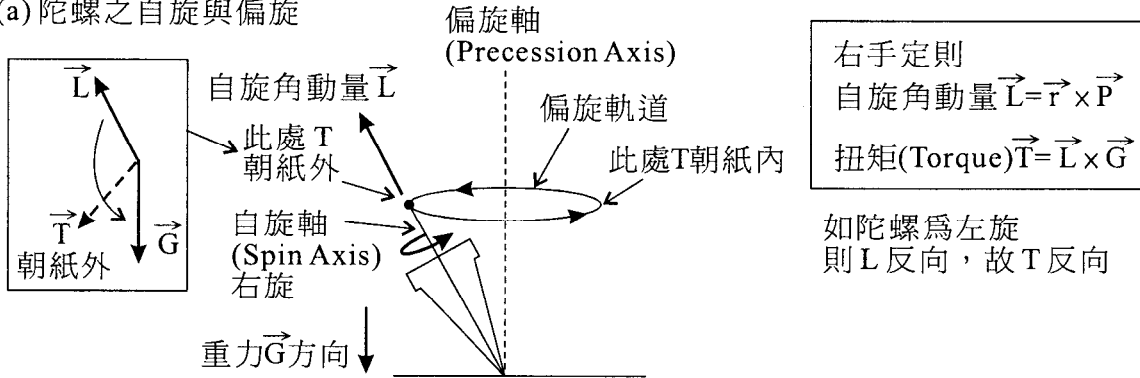
電流 I 或陽離子 \oplus 與自由電子流 e 反向
 自由電子如陰極射線電子或電漿中電子
 自由電子 κ 軌域電子

電子磁轉比為負值, 角動量與磁矩反向
 本圖未繪出電子在外加磁場影響下
 空間取向量子化與內稟自旋磁矩之特殊性質

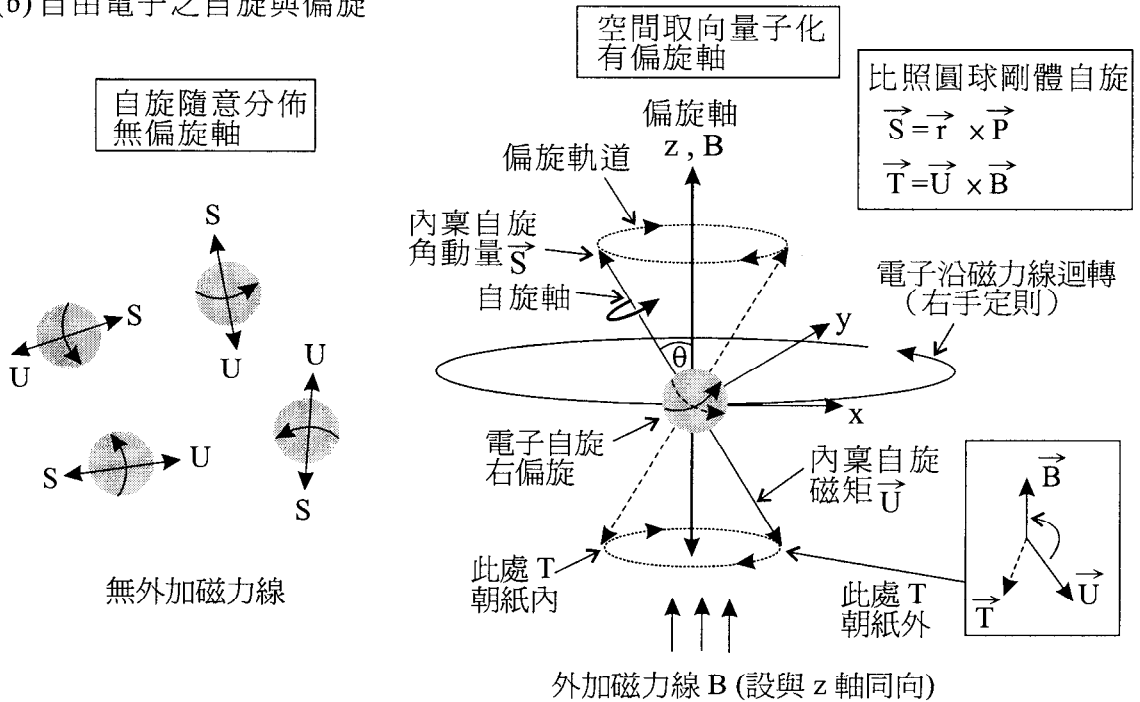
圖 1-1-2 圓盤剛體之(a)角速度; (b)切線速度; (c)角動量;

(d)自由電子在外加磁力線影響下之角動量與磁矩示意圖

(a) 陀螺之自旋與偏旋



(b) 自由電子之自旋與偏旋

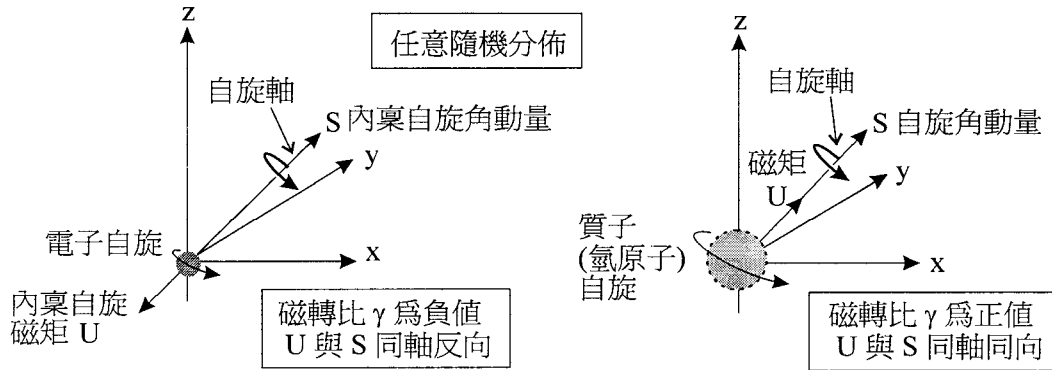


- 註：1. 圖例(a)之重力 \vec{G} 與外加磁力線 \vec{B} 反向
 2. 圖例(b)內稟自旋磁矩與外加磁場反向，為高能態，以便與圖例(a)陀螺比較，順向低能態未繪出
 3. 根據巨觀現象假設電子為自旋球體，微觀真實情況不明，仍為近代物理迷思，或可視為能量狀態

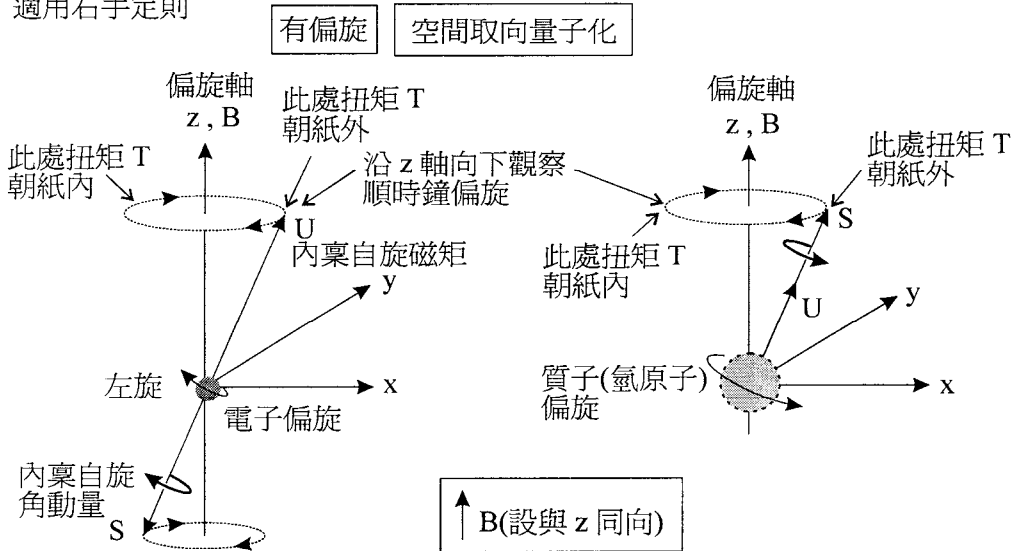
圖 1-1-3 陀螺與自由電子之自旋與偏旋

10 半導體微影技術

(a) 無外加磁力線：電子與質子自旋角動量向量方向呈任意隨機分佈，自旋相關能量相等
適用右手定則



(b) 有外加磁力線 B ：產生偏旋，自旋角動量向量空間取向量子化，能量不相等
適用右手定則



內稟自旋磁矩 U 在磁場 B 受到之扭矩(Torque) $\vec{T} = \vec{U} \times \vec{B}$ 叉積適用右手定則
電子內稟自旋角動量 S 與磁矩 U 關係：

$$\vec{U} = -\frac{e}{2m_e} g \vec{S}$$

- g ：
1. 磁轉比(Gyromagnetic Ratio, Magnetogyric Ratio)
 2. 自旋 g -因子(Spin g -factor)
 3. 茲曼分裂因子(Zeeman Splitting Factor)
 4. 藍德 g -因子(Lande's g -Factor)

e ：電子之電荷
 m_e ：電子之質量

自由電子自旋 $g_{fs} = 2.002319304386$ ，軌域電子自旋 $g_{os} \sim 2.0$ ，二者略有差異

簡式 $\vec{U} = \gamma \vec{S}$ γ ：亦稱磁轉比（電子為負值，質子為正值）

圖 1-1-4 電子與質子之自旋角動量與磁矩