

國立臺灣師範大學114學年度第二學期
補助學生辦理讀書會
「每次紀錄表暨成果報告」

量子世界的探究與討論 讀書會

目錄

一、讀書會簡介.....	3
二、讀書會內容.....	4
三、讀書會運作紀實(需至少討論5次).....	5
四、讀書會活動照片(線上討論須提供合影截圖).....	7
五、讀書會心得或感想.....	9
六、附錄.....	10

一、讀書會簡介

讀書會名稱	量子世界的探究與討論
活動期程	自2026年3月30日 至 2026年6月12日 止
申請人（會長）	會長 物理學系 000
成員	成員 物理學系 000
	成員 物理學系 000
	成員 物理學系 000
	成員 物理學系 000

二、讀書會內容

活動內容

一、研討主題說明

本系量子力學課程受限於每週3小時授課時數，內容偏向於快速理解與重點導向，學生對於深刻的數學基礎與理論推導的內容較難具有深刻的連結。因此，本次申請讀書計劃旨在透過跳脫單向的學習模式，建立一個能透過共學並建立良好的數學架構與物理直覺。量子力學中所需的數學基礎與抽象思考能力極為嚴苛，我們需要熟悉廣義向量空間、無窮級數、廣義傅立葉轉換、泛函理論等高難度數學技巧，因此，我們將籌組高強度讀書會，透過學術辯論與同儕審查，相互指出各自的盲點，確保每人都能理解並跟上進度。此外，我們將採用問題導向學習，除了對作業與考古題內容進行討論，我們也會直接請一位同學進行出題，考驗其餘同學的學習狀況與出題同學對內容的掌握度。

二、閱讀材料說明

Principles of Quantum Mechanics (R. Shankar)

選讀原因：本書為量子力學的重要教材之一，內容從基本公設、對稱性、角動量到近似方法皆有完整且嚴謹的推導，特別適合用於讀書會討論量子力學的理论架構與數學基礎。

Modern Quantum Mechanics (J. J. Sakurai)

選讀原因：此書為高年級與研究生常用教材，強調量子力學的對稱性與角動量理論，並以現代觀點介紹量子態與算符形式，適合作為深入討論角動量、自旋與量子糾纏等主題的閱讀材料。

Relativistic Quantum Mechanics (J. D. Bjorken、S. D. Drell)

選讀原因：本書為相對論量子力學經典教材，系統介紹 Klein-Gordon 與 Dirac 方程等內容，對於理解相對論性量子理論與粒子物理基礎具有重要價值。

三、運作方式說明

聚會頻率：每週一晚上19:00 至22:00，段考週則是每日晚上18:00 至21:00
進行方式：

1. 進度討論(1hr)：參與者在聚會前完成當週進度導讀，並完成指定作業，該週主講者於物理系公用教室 S701教室進行逐題講解與討論

2. 觀念補強(1hr)：參與者在討論完後，收集無法掌握的部分，由有想法的人進行講解，確定理解後馬上針對該部分進行出題，再次鞏固觀念。
3. 追求卓越(1hr)：由團隊內基礎較好的成員，在基礎穩固的前提下，嘗試速解法或更為艱深、更為複雜的方法進行相同題目的解答，最後，透過比較基礎方法與速解法，尋求最適合自己的解法
段考週會進行密集的題庫訓練，並同時複習解題所需的觀念。

三、讀書會運作紀實(需至少討論5次)

第幾次討論	1	導讀人	
日期		記錄人	
出席成員			
開始時間結束時間			
研討主題	量子力學中的角動量加法與 Clebsch - Gordan 係數推導		
閱讀材料	量子力學（二）課程講義（角動量加法章節） Homework set #5 題目與解答		
研讀內容摘要			
本次讀書會主要聚焦於角動量加法（angular momentum addition）與 Clebsch - Gordan（CG）係數的計算方法。首先從具體例子 $j_1 = 1$ 與 $j_2 = 1/2$ 出發，透過角動量加法規則 $j = j_1 - j_2$ 至 $j_1 + j_2$，確定總角動量可能為 $j = 3/2$ 與 $j = 1/2$。接著列出所有未耦合基底 $j_1, m_1\rangle j_2, m_2\rangle$，並利用最高態唯一性，直接寫出 $3/2, 3/2\rangle$。 在此基礎上，透過下降算符 $J_- = J_{1-} + J_{2-}$ 的作用，逐步推導其他態，例如 $3/2, 1/2\rangle$，並從算符作用係數中自然得到 $\sqrt{2/3}$、$\sqrt{1/3}$ 等 CG 係數。進一步利用正交性條件，構造 $j = 1/2$ 的態，並確認其與 $j = 3/2$ 的態在同一 m 下互相正交。此過程同時揭示對稱與反對稱組合對應不同總角動量的結構。 接著進入一般形式的推導，將耦合態展開為未耦合基底的線性組合，並對整體施加升降算符，推導出 CG 係數的 recursion relation。此關係顯示不同 m 的係數之間存在遞迴連結。最後將此結果應用於 $\ell + 1/2$ 的情形，透過邊界條件（最高態係數為 1）與 telescoping 技巧，得到 CG 係數的封閉形式解。整體過程從具體計算延伸至一般理論，建立完整的理解架構。			
研讀意見/討論紀錄			
在討論過程中，多數成員初期對 CG 係數的來源感到困惑，尤其是 $\sqrt{2/3}$、$\sqrt{1/3}$ 等數值的出現。透過實際操作 ladder operator，逐步從最高態往下降推導後，逐漸理解這些係數並非憑空出現，而是由角動量算符的代數結構所決定。 另一個主要討論點在於 recursion relation 的推導。初看公式時容易因符號複雜而失去方向，但在逐項拆解 $J_+ = J_{1+} + J_{2+}$ 的作用後，可以明確看到每一項如何對應到不同的基底轉換。透過重標變數（index relabeling），成功將結果整理為遞迴關係。 此外，對稱與反對稱組合的物理意義也被反覆討論。透過與兩個 spin-1/2 系統中的 singlet 與 triplet 對照，可以更直觀理解為何對稱組合對應較大的總角動量，而反對稱組合對應較小的總角動量。這部分有效連結了抽象計算與物理圖像。			

研讀心得/結論紀錄

這次讀書會終於順利展開，整體氣氛比想像中還要熱絡，大家一開始雖然對作業五的內容有點畏懼（畢竟 Clebsch-Gordan 係數真的不太親民），但實際一起拆解之後，反而有一種「原來可以這樣看」的豁然開朗感。

本次主軸圍繞在角動量加法與 CG 係數的理解。我們從第一題的具體例子切入： $j_1 = 1$ 、 $j_2 = 1/2$ 。這一題的關鍵在於先掌握總角動量的可能取值，透過 $j = |j_1 - j_2|$ 到 $j_1 + j_2$ ，我們得到 $j = 3/2$ 與 $1/2$ 。這一步其實大家都還算熟，但真正的挑戰是在後面——如何把耦合態寫成未耦合基底的線性組合。

我們從最高態 $|3/2, 3/2\rangle$ 開始，因為這個態是唯一的，不需要猜，直接就是 $|1, 1\rangle|1/2, 1/2\rangle$ 。接著利用下降算符 J_- 一路往下推，慢慢生成 $|3/2, 1/2\rangle$ 、 $|3/2, -1/2\rangle$ 等等。這一段過程其實是本次討論的第一個「頓悟點」：大家發現那些 $\sqrt{2/3}$ 、 $\sqrt{1/3}$ 並不是神秘常數，而是從算符作用的係數自然跑出來的。原本看起來很抽象的 CG 係數，突然變得有來源、有邏輯。

接下來我們處理 $j = 1/2$ 的態。這裡的重點是「正交性」：在同一個 m 下，不同 j 的態必須彼此正交。於是我們把已經求出的 $j = 3/2$ 態當作參考，反推出 $j = 1/2$ 的組合。這一段讓大家重新意識到「對稱與反對稱」的重要性，也和之前學過的 singlet / triplet 有了漂亮的連結。當看到 $(\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow)$ 對應較大的 j ，而 $(\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow)$ 對應較小的 j 時，整個物理圖像就清楚了。

第二題的難度明顯提升，但也更有結構。我們從一般展開式出發，對整個態作用 J_+ 與 J_- ，推导出 recursion relation。這一步一開始大家都有點抗拒，因為式子看起來很長，但實際一步一步拆開後會發現，本質上就是「算符怎麼作用在 tensor product 上」。當大家意識到 $J_+ = J_{1+} + J_{2+}$ 時，整個推導就開始變得有跡可循。

在第二題(c)，我們把一般公式套到 $\ell + 1/2$ 的情況。這裡的關鍵技巧是選擇適當的 m_s （例如固定 $m_s = +1/2$ ），讓式子簡化。這一題討論時，有人一開始會卡在 index 的轉換，但當大家一起把 $m = m_\ell + m_s$ 寫清楚後，就順很多。這也是本次讀書會的一個收穫：很多困難其實不是概念，而是符號沒有整理好。

最後的第 2(d) 題是整個高潮。我們利用 recursion relation，把不同 m 的係數一路串起來，然後用最高態作為邊界條件，一步步往下推。這裡最有趣的是 telescoping 的效果：很多項會自動消掉，最後留下非常乾淨的結果 $C(m) = \sqrt{(\ell + m + 1/2)/(2\ell + 1)}$ 。當這個結果出現時，大家幾乎都有一種「欸這也太漂亮了吧」的感覺。

整體而言，這次讀書會的節奏從一開始的「有點怕」到後來的「其實可以掌握」，轉變非常明顯。大家不只是把題目算完，更重要的是理解了背後的結構：CG 係數其實是由對稱性、角動量代數以及邊界條件共同決定的，而不是需要死記的東西。

這次的討論也讓我們更有信心面對後續的量子力學內容。當方法抓到之後，原本看起來很複雜的問題，其實可以被拆解成一連串有邏輯的小步驟。這種從混亂到清晰的過程，某種程度上也是讀書會最有價值的地方。

研讀附件/補充資料

作業五題目

CG 係數表

Quantum Mechanics (II), Spring 2026

Homework set #5, due on 4/1/2026

1. (20 points) Consider a system of a particle with angular momentum $j_1 = 1$ and a particle with $j_2 = 1/2$.

- (a) What are the possible values of the quantum numbers for total angular momentum j ? z -component of angular momentum m ?
(b) Find the C-G coefficients.

2. (40 points) Given j_1 and j_2 , for a fixed j , we start with

$$|j_1, j_2; j, m\rangle = \sum_{m_1} \sum_{m_2} |j_1, m_1; j_2, m_2\rangle \langle j_1, m_1; j_2, m_2 | j, m \rangle. \quad (1)$$

(a) Apply $J_+ = J_{1+} + J_{2+}$ to equation (1), show that .

$$\begin{aligned} & \sqrt{(j-m)(j+m+1)} \langle j_1, m_1; j_2, m_2 | j, j, m+1 \rangle \\ &= \sqrt{(j_1-m_1+1)(j_1+m_1)} \langle j_1, m_1-1; j_2, m_2 | j, j, m \rangle \\ &+ \sqrt{(j_2-m_2+1)(j_2+m_2)} \langle j_1, m_1; j_2, m_2-1 | j, j, m \rangle. \end{aligned} \quad (2)$$

This is called " J_+ recursion relation".

(b) Apply $J_- = J_{1-} + J_{2-}$ to equation (1), show that .

$$\begin{aligned} & \sqrt{(j+m)(j-m+1)} \langle j_1, m_1; j_2, m_2 | j, j, m-1 \rangle \\ &= \sqrt{(j_1+m_1+1)(j_1-m_1)} \langle j_1, m_1+1; j_2, m_2 | j, j, m \rangle \\ &+ \sqrt{(j_2+m_2+1)(j_2-m_2)} \langle j_1, m_1; j_2, m_2+1 | j, j, m \rangle. \end{aligned} \quad (3)$$

This is called " J_- recursion relation".

(c) Now, consider the addition of orbital and spin-1/2 angular momenta, namely, we can take $j_1 = \ell$, $m_1 = m_\ell$, $j_2 = s = 1/2$ and $m_2 = m_s = \pm 1/2$. Using J_+ or J_- recursion relation, for $j = \ell + 1/2$, show that

$$\begin{aligned} & \langle \ell, m_\ell = m - \frac{1}{2}; s = \frac{1}{2}, m_s = \frac{1}{2} | j = \ell + \frac{1}{2}, m \rangle \\ &= \sqrt{\frac{\ell+m+1/2}{\ell+m+3/2}} \langle \ell, m_\ell = m + \frac{1}{2}; s = \frac{1}{2}, m_s = \frac{1}{2} | \ell, s = \frac{1}{2}, j = \ell + \frac{1}{2}, m+1 \rangle. \end{aligned} \quad (4)$$

(d) Using (c), derive

$$\langle \ell, m_\ell = m - \frac{1}{2}; s = \frac{1}{2}, m_s = \frac{1}{2} | j = \ell + \frac{1}{2}, m \rangle = \sqrt{\frac{\ell+m+1/2}{2\ell+1}} \quad (5)$$

34. CLEBSCH-GORDAN COEFFICIENTS, SPHERICAL HARMONICS, AND d FUNCTIONS

Note: A square-root sign is to be understood over every coefficient, e.g., for $-5/15$ read $-\sqrt{5/15}$.

Notation: $j \quad J \quad \dots$
 $m_1 \quad m_2 \quad \dots$
 $M \quad M \quad \dots$
Coefficients

$Y_0^0 = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \cos \theta$
 $Y_1^0 = \sqrt{\frac{3}{8\pi}} \sin \theta \cos \theta$
 $Y_1^{\pm 1} = \mp \sqrt{\frac{3}{8\pi}} \sin \theta e^{\pm i\phi}$
 $Y_2^0 = \sqrt{\frac{5}{16\pi}} \left(\frac{3}{2} \cos^2 \theta - \frac{1}{2} \right)$
 $Y_2^{\pm 1} = \sqrt{\frac{15}{8\pi}} \sin \theta \cos \theta e^{\pm i\phi}$
 $Y_2^{\pm 2} = \sqrt{\frac{15}{32\pi}} \sin^2 \theta e^{\pm 2i\phi}$

$Y_{\ell}^m = (-1)^m Y_{\ell}^{m*}$
 $d_{\ell}^{\ell,0} = \sqrt{\frac{2\ell+1}{3}} Y_{\ell}^0 \cos \theta$

$d_{\ell}^{j_1, m_1; j_2, m_2} = (-1)^{j_1-m_1} d_{\ell, m_1}^{j_1, m_1; j_2, m_2}$
 $d_{\ell}^{j_1, m_1; j_2, m_2} = (-1)^{j_1-m_1} d_{\ell, m_1}^{j_1, m_1; j_2, m_2}$

Figure 34.1: The sign convention is that of Wigner (Group Theory, Academic Press, New York, 1959), also used by Condon and Shortley (The Theory of Atomic Spectra, Cambridge Univ. Press, New York, 1935), Rose (Elementary Theory of Angular Momentum, Wiley, New York, 1967), and Cohen (Tables of the Clebsch-Gordan Coefficients, North American Rockwell Science Center, Thousand Oaks, Calif., 1974). The coefficients here have been calculated using computer programs written independently by Cohen and at LBNL.

第幾次討論	2	導讀人	
日期		記錄人	
出席成員			
開始時間結束時間			
研討主題	量子力學中的二維簡諧振子、微擾理論與變分法之應用		
閱讀材料	Quantum Mechanics (II) Homework Set #7 課堂講義中關於二維簡諧振子（2D harmonic oscillator）之章節 微擾理論（Perturbation Theory）與變分法（Variational Method）相關教材		
研讀內容摘要			
本次讀書會主要討論量子力學作業七的內容，主題包含二維簡諧振子、微擾理論與變分法。雖然這些名詞一開始聽起來很複雜，但實際討論後，大家發現它們其實都和「怎麼用簡單方法理解複雜世界」有關。 一開始我們先討論二維簡諧振子，可以把它想像成一顆小球被彈簧拉著，在平面上左右、上下來回震動。因為它同時會在 x 與 y 方向運動，所以比高中常見的一維振動再複雜一點。不過討論後發現，這個問題其實可以拆成兩個比較簡單的部分來看，這也讓大家理解到，物理學中很多複雜問題其實都可以「拆小再處理」。 接著題目又加入一點額外影響，可以理解成原本平穩的系統突然受到一些小干擾。這部分就是微擾理論。讀書會中，大家把它類比成「原本平靜的水面突然丟進一顆小石頭」，雖然系統會改變，但因為改變不大，所以不需要全部重算，只要估計它受到多少影響即可。大家後來也發現，其實生活中很多事情都是這樣，例如天氣預報、股票波動，甚至工程模擬，都會利用「小改變不會完全破壞系統」的概念來做近似估計。 討論過程中，我們也發現量子力學很重視「對稱性」。有些原本看起來很複雜的數學式子，最後會因為系統左右對稱、上下對稱而直接簡化掉。這讓大家開始理解，物理學家並不是每次都硬算，而是會先觀察系統有沒有規律與特徵。			

第二題則是在討論變分法。這部分大家覺得比較有趣，因為它很像是在「猜答案」。如果某個問題太難直接算出真正答案，物理學家就會先猜一個看起來合理的情況，再慢慢調整，讓結果越來越接近真實答案。大家把它比喻成玩射飛鏢時，一開始不可能直接射中紅心，但可以透過不斷修正方向，越來越靠近中心。

研讀意見/討論紀錄

題目中的系統和地球重力有關，也讓大家開始發現，原來量子力學不只是課本上的抽象公式，而是真的能和現實世界連結。例如後來查資料時發現，科學家真的做過實驗，觀察到粒子在重力影響下出現量子化能階。這讓大家印象很深，因為以前總覺得量子力學離生活很遠，但其實手機、電腦晶片、雷射甚至 MRI 等科技背後，都和量子力學有關。

研讀心得/結論紀錄

整體而言，本次讀書會最大的收穫，是理解到量子力學中很多問題其實都無法直接得到精確解，因此各種近似方法變得非常重要。無論是微擾理論還是變分法，本質上都在處理那些真實世界中太複雜、無法完全精確計算的系統。過去學量子力學時，很容易把重點放在公式推導與計算，但這次討論後，大家開始比較能把數學與物理圖像連結起來。例如微擾理論其實是在研究「小改變會如何影響系統」，而變分法則是在「利用合理猜測逐漸接近真實答案」。此外，也發現這些方法其實與現代科技密切相關，例如半導體、量子材料、低溫物理與量子計算等領域，都會大量使用類似的近似技巧。整體而言，這次讀書會不只是完成作業，更讓大家開始理解物理學家實際是如何思考與處理問題的。

研讀附件/補充資料

課本中 ladder operator、期望值與 trial wave function 之內容
量子簡諧振子與量子井模型的補充資料

第幾次討論	3	導讀人	
日期		記錄人	
出席成員			
開始時間結束時間			
研討主題	量子力學中的剛體轉子/量子擺與微擾理論應用		
閱讀材料	Quantum Mechanics (II) Homework Set #8 課堂講義中關於剛體轉子與簡諧振子的章節 微擾理論 (Perturbation Theory) 相關補充資料		
研讀內容摘要			
本次讀書會主要討論 Homework Set #8 的內容，主題包含剛體轉子 (rigid rotor)、量子擺 (quantum pendulum)、二維簡諧振子與微擾理論等。相較於前幾次偏向單純計算，本次作業更強調「近似方法」與「如何把複雜問題轉換成熟悉模型」，因此大家除了計算之外，也花了不少時間理解背後的物理意義。 第一題討論的是剛體轉子系統，可以把它想像成一根能自由旋轉的小棒，只能在平面內轉動。題目中加入了電偶極矩與外加電場，因此系統會受到外界影響。大家先重新整理角動量與轉動能量的概念，理解為什麼量子力學中的旋轉不是任意連續，而是只能對應到特定量子態。之後再加入電場，討論能量如何受到改變。討論時，大家把這部分類比成「原本自由旋轉的指南針突然遇到磁場」，因此開始偏向特定方向。這也讓大家比較容易理解微擾理論的概念，也就是當系統只受到小影響時，不需要全部重新計算，而是估計它偏離原本狀態多少即可。 在討論過程中，也重新整理了「簡併」的概念，也就是不同量子態可能具有相同能量。原本有些同學以為只要有簡併就一定要做非常複雜的計算，但後來發現，還要看外加擾動是否真的會讓不同狀態彼此混合。這讓大家開始比較能理解量子力學中「對稱性」的重要性，而不是只會代公式。 第二題則是量子擺 (quantum pendulum)。這個系統其實很像高中物理中的單擺，只是現在改用量子力學方式處理。大家先利用小角度近似，把原本很複雜的擺動問題轉換成熟悉的簡諧振子，因此能比較容易求出能量。後半部分則加入更高階修正，討論當擺動角度不再很小時，系統會受到哪些影響。這部分讓大家發現，很多物理公式其實都有適用範圍，而不是永遠完全正確。例如高中常用的小角度近似，其實只有在角度夠小時才成立。這也讓大家重新理解到，物理學中「知道公式什麼時候失效」其實和會套公式一樣重要。			

第三題再次回到二維簡諧振子。由於前一次作業已經討論過類似系統，因此這次大家在理解量子態與微擾時明顯比較熟悉。討論中，大家也開始能自己判斷哪些項目會因為對稱性而直接消失，而不是每次都從頭硬算。這讓大家逐漸感受到，量子力學並不只是複雜數學，而是一種尋找系統規律的方法。此外，本次讀書會也延伸討論到生活中的應用。例如剛體轉子的概念其實和分子轉動有關，在化學與材料科學中，科學家會利用分子的旋轉能階分析物質結構；而簡諧振子的概念則幾乎出現在所有物理領域，從原子振動、晶體結構到聲波與量子材料，都能看到類似模型。大家也發現，雖然課本中的模型看起來很理想化，但其實很多現代科技都是從這些基本模型慢慢發展出來的。

研讀意見/討論紀錄

本次讀書會中，大家普遍認為微擾理論與近似方法比前面的內容更抽象，因為它不像一般題目能直接求出完整答案，而是需要判斷哪些部分可以忽略、哪些影響比較重要。一開始大家對「為什麼可以只算修正量」比較不習慣，但後來透過生活中的例子，例如天氣變化、鐘擺擺動與小幅震動等情況後，逐漸比較能理解這種「近似處理」的概念。

另外，在量子擺的部分，大家也重新複習了高中物理中的單擺模型，並發現原來很多大學量子力學內容，其實都是從高中物理延伸而來。討論後也比較能理解，物理學家常會先從簡單模型開始，再一步一步加入更真實的修正。

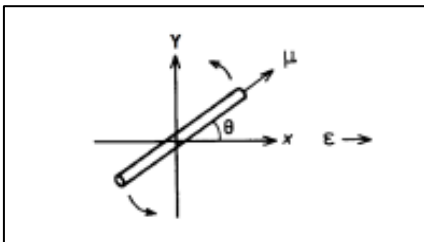
研讀心得/結論紀錄

本次讀書會最大的收穫，是大家開始理解「近似方法」在物理中的重要性。過去常以為物理一定要得到精確答案，但實際上，很多真實世界的問題都非常複雜，因此物理學家更重視如何找到合理、有效的近似方式。

透過這次討論，大家不只學會作業中的計算，也開始比較能理解物理學家真正處理問題的思考方式。例如微擾理論其實是在研究「小改變會對系統造成多少影響」，而小角度近似則是在條件合理時，把困難問題簡化成比較容易處理的形式。這些想法其實不只出現在量子力學，也廣泛應用在工程、材料科學與現代科技之中。

研讀附件/補充資料

小角度近似與量子擺模型介紹



第幾次討論	4	導讀人	
日期		記錄人	
出席成員			
開始時間結束時間			
研討主題	時間相依微擾理論與自旋系統應用		
閱讀材料	Quantum Mechanics (II) Homework Set #9 課堂講義中關於時間相依微擾理論的章節		
研讀內容摘要			
本次讀書會主要討論 Homework Set #9 的內容，主題包含時間相依微擾理論、氫原子在電場中的激發，以及電子自旋在磁場中的行為。和前幾次相比，這次的重點不再只是「系統有哪些能量」，而是開始研究「量子態會如何隨時間改變」。 第一題討論的是粒子被限制在一維盒子中的情況。題目設定粒子原本在基態，但之後系統受到一個會隨時間慢慢衰減的外加擾動。大家一開始先重新整理一維量子井的波函數與能量分布，接著開始思考：如果系統突然受到影響，粒子還會一直停留在原本狀態嗎？討論後大家發現，在量子力學中，外界擾動其實可能讓粒子從原本能階跳到其他激發態，而時間相依微擾理論的目的，就是計算這種「跳躍機率」。 讀書會中，大家把這件事類比成「平靜的水面受到外力干擾後開始產生波動」，原本穩定的狀態會因為外界影響而改變。題目也特別比較了非常短時間與非常長時間下的結果，讓大家理解不同時間尺度下，系統的反應會不一樣。 第二題則是氫原子在電場中的問題。題目設定氫原子一開始位於基態，之後施加一個會隨時間衰減的電場，並要求估計原子被激發到第二能階的機率。這部分讓大家重新理解到，原子中的電子其實並不是固定不動，而是可能因為外界能量而改變量子態。討論時，也延伸提到生活中的例子，例如霓虹燈、螢光燈與雷射，其本質上都和電子吸收能量後跳躍到激發態有關。 此外，大家也開始接觸到「selection rule (選擇定則)」的概念，也就是並不是所有能階之間都能隨意跳躍，而是必須符合特定條件。這讓大家發現，量子力學中的變化其實並不是完全隨機，而是受到對稱性與量子數限制。			

第三題則是電子自旋與磁場的問題。題目考慮電子原本自旋朝向 z 方向，之後系統再逐漸加入另一個 x 方向磁場。討論過程中，大家重新複習了 spin-up 與 spin-down 的概念，並理解外加磁場其實會影響電子自旋方向。

這部分大家覺得特別有趣，因為它很像在討論一個小磁鐵如何被另一個磁場慢慢「扭轉方向」。而題目後半部分又比較「磁場改變很慢」與「磁場改變很快」兩種情況，讓大家發現系統的反應其實和變化速度有關。如果外界改變得非常慢，量子系統通常能慢慢跟上；但如果改變太快，系統可能來不及調整，因此保持在原本狀態。這也讓大家第一次接觸到類似絕熱近似（adiabatic approximation）的概念。

研讀意見/討論紀錄

本次讀書會中，大家普遍認為時間相依微擾理論比之前更難理解，因為系統不再只是固定不變，而是需要考慮「隨時間演化」。一開始很多人對於「為什麼量子態會跳躍」沒有太直觀的感覺，但透過水波、震動與共振等生活化例子後，逐漸比較能理解外界擾動如何影響量子系統。

另外，在氫原子的部分，大家也發現原本課本中的能階圖其實和日常生活中的發光現象有關，這讓抽象的量子力學開始和現實世界產生連結。

至於自旋與磁場的問題，大家一開始比較容易把它想成經典物理中的小磁針，但後來逐漸理解量子自旋其實並不是單純旋轉，而是一種量子性質。討論過程中，也花了一些時間整理 spin-up、spin-down 與磁場方向之間的關係。

研讀心得/結論紀錄

本次讀書會最大的收穫，是大家開始理解量子力學中的系統其實不是靜止不變，而是會隨著外界環境與時間不斷演化。過去比較常處理固定能量與固定波函數，但這次開始接觸「量子態如何改變」的問題，也讓大家對量子力學有更動態的理解。此外，透過氫原子與自旋系統的例子，大家也逐漸發現量子力學其實與現代科技非常接近。例如電子能階躍遷與發光、磁場控制自旋，以及核磁共振等技術，都與本次討論的內容密切相關。

整體而言，本次讀書會不只是練習作業計算，更讓大家開始理解量子系統如何受到外界影響，以及物理學家如何利用數學描述這些隨時間變化的現象。

研讀附件/補充資料

氫原子與自旋系統相關補充資料
磁場與量子態轉換的基礎介紹

第幾次討論	5	導讀人	
日期		記錄人	
出席成員			
開始時間結束時間			
研討主題	量子力學中的時間演化與時間相依微擾理論		
閱讀材料	Quantum Mechanics (II) Homework Set #10 課堂講義中關於 time-dependent perturbation theory 的內容		
研讀內容摘要			
本次讀書會主要討論 Homework Set #10 的內容，主題包含時間相依微擾理論（time-dependent perturbation theory）與量子系統的時間演化。和前幾次相比，這次更強調「量子態如何隨時間改變」，而不是只討論固定能量與靜態波函數。 第一題考慮一個粒子被限制在一維盒子中，原本位於基態，之後系統突然受到外加電場影響。題目要求利用時間相依微擾理論，計算粒子跳到激發態的機率。討論過程中，大家重新整理了量子井模型與能階結構，並開始理解量子系統其實會因為外界擾動而發生「躍遷」。大家把這部分類比成原本平靜的水面突然受到外力擾動，因此開始產生新的波動模式。原本粒子待在最低能量狀態，但當外加電場加入後，系統便有機會吸收能量並進入更高能階。這也讓大家逐漸理解，量子力學中的「能階跳躍」並不只是課本上的圖，而是真正會因外界作用而發生的現象。 討論中，大家也重新認識到「時間」在量子力學中的角色。以前較常處理固定不變的系統，但這次開始研究量子態如何隨時間演化，以及外界作用時間長短會如何影響躍遷機率。題目中特別考慮很短時間的情況，因此大家也發現，如果外界作用時間非常短，系統通常還來不及完全改變。此外，我們也延伸討論到生活中的應用，例如原子吸收光、雷射、LED 與核磁共振等技術，本質上都和量子態之間的躍遷有關。這讓大家開始發現，量子力學其實離現代科技非常近，而不是只存在於課本中。 第二題則是二能階系統（two-state system）與時間演化算符的問題。題目設定系統只有兩種狀態，可以想像成量子版的「開」與「關」，而系統原本在其中一個狀態，之後因為微小擾動而開始在兩種狀態之間轉換。			

討論過程中，大家發現這部分和之前學過的自旋系統很像，也開始理解量子系統中的「疊加態」與「機率振盪」概念。原本大家直覺上會認為系統應該慢慢從一個狀態變成另一個，但後來發現，量子系統其實更像是在兩種狀態之間來回振盪，而不是單向改變。

大家也把這部分和生活中的擺動現象做比較，例如鐘擺或彈簧會週期性來回震動，而量子系統中的機率其實也會隨時間週期性變化。這讓原本抽象的時間演化算符開始變得比較有畫面。

研讀意見/討論紀錄

本次讀書會中，大家普遍認為時間相依微擾理論比之前更難理解，因為系統不再是固定不變，而是需要考慮時間演化與外界作用。尤其是一開始接觸「躍遷機率」時，很多人不太習慣量子系統會在不同能態之間改變。

另外，在二能階系統部分，大家一開始容易把量子態轉換想成經典物理中的直接翻轉，但後來逐漸理解量子系統其實更像是機率振盪，而不是簡單切換。透過畫圖與生活化比喻後，大家對時間演化的概念也比較有直覺。

研讀心得/結論紀錄

本次讀書會最大的收穫，是大家開始理解量子系統其實不是靜止不變，而是會隨著時間與外界影響持續演化。過去比較常處理固定能量與固定波函數，但這次開始接觸「量子態如何改變」後，也讓大家對量子力學有更動態的理解。

此外，透過量子井與二能階系統的例子，大家也逐漸理解現代科技中的許多裝置，其實都和量子態轉換有關。例如雷射、量子計算與核磁共振等技術，本質上都需要控制量子態如何隨時間演化。

整體而言，本次讀書會不只是練習數學計算，更讓大家開始理解量子系統如何受到外界影響，以及物理學家如何利用數學描述這些隨時間改變的現象。

研讀附件/補充資料

時間演化算符 (time-evolution operator) 相關補充資料
二能階系統與量子躍遷介紹