

教育部教學實踐研究計畫成果報告
Project Report for MOE Teaching Practice Research Program

計畫編號/Project Number：PMS1110082

學門專案分類/Division：數理

計畫年度：111 年度一年期 110 年度多年期

執行期間/Funding Period：2022.08.01 – 2023.07.31

有感的物理教學：提升量化估算能力的物理課程精緻化、推廣及成效評估

配合課程名稱：普通物理、物理之美、生活中的物理學

計畫主持人(Principal Investigator)：朱慶琪

執行機構及系所(Institution/Department/Program)：國立中央大學／物理系

成果報告公開日期：立即公開 延後公開（統一於 2025 年 7 月 31 日公開）

繳交報告日期(Report Submission Date)：2023 年 9 月 19 日

有感的物理教學：提升量化估算能力的物理課程精緻化、推廣及成效評估

一. 本文

1. 研究動機與目的 Research Motive and Purpose

(1) 教學實踐研究計畫動機

● 內在動機與外在動機

在過去，大學教學現場的問題與挑戰，可能因其複雜與困難而無法啟動全面性的實踐研究。107 年開始，教育部提供教學實踐研究計畫這個平台，讓教學者有機會透過實徵的研究，尋找困難問題的可能解答，這是作為研究者最大動機。申請人長期以來關注的議題，無論是大或小，其最終目的都聚焦在如何提升學生的學習成效，以及培養學生具備的 21 世紀的公民應有的核心能力為首，故以下將說明本計畫研究主題與核心能力的關係。

「小助理面試亞馬遜當場錄用，她如何回答貝佐斯兩道難題？」2002 年，希亞特 (Ann Hiatt) 與執行長貝佐斯面試時，她是如何靠著優秀的回答，成為全亞馬遜離貝佐斯最近的員工？(Hiatt, 2021) 兩題中那道奇特的動腦題：「估算西雅圖市有多少片扇玻璃窗」，究竟該怎麼回答？除此之外，網路上也流傳 Google 面試時會問的另類問題，「一輛校車可以裝下多少顆高爾夫球？」這些問題都涉及結合常識與知識的相互運用，以及基本的估算能力，在物理圈子中，就是我們俗稱的「費米問題」。費米問題的定義為：Estimation of rough but quantitative answers to unexpected questions about many aspects of the natural world. (Morrison, 1963)，有別於條件完整明確的課本習題，但卻更接近真實生活的應用，它幫助我們在很短的時間內、以有限的資訊做出合理的評估，這也是科學研究者在處理橫跨幾十個數量級的未知領域時，必備的技能。

以上故事及資料或有主觀成分的疑問，但梳理相關研究資料後也發現，Holubova (Holubova, 2016) 的研究顯示，估計類的問題和費米問題能夠促進學生創造力發展，而 Ärleback 與 Albarracín (Ärleback, J. B., & Albarracín, L., 2017) 的研究也發現，解決費米問題的量化思考方式有助於提升 STEM 學生 21 世紀的競爭力。因此這些看似另類的問題解決，反而是培育學生過程中不可或缺的一環。

● 教學現場的現況與問題

理工科系大學學生們，在學習物理的認知層次上，無法從「記憶」、「理解」的層次，往上到「應用」層次，故主持人近年來的計畫主軸，均環繞在如何提升大學生的核心能力及素養，企圖找出好的模式來訓練大學生，以達到此教學目標。然而執行這些計畫時，普遍遭遇的困難包括，第一、要將學生從原本的舒適圈中拉出來，會遇較大的抗拒力量。舉例而言，學生沒有估算的能力，常常給出非常離譜的答案而渾然不自知，然而這卻無法究責於學生，畢竟他們過去十幾年在制式教育環境下培養出來的習慣，每個考題都會有精準的答案，因此遇到「沒有標準答案」的題目時，不知如何切入、如何分析、如何解決，是再自然不過的。因此如何藉由課程設計與教師的引導，循序漸進地建立良好的習慣及適當的能力，是課程是否能產出好的教學成效的關鍵。又或者，身為數位移民 (digital immigrants) 的教師們，面對這群數位原住民 (digital natives) 的學生，如何將他們從虛擬與網路的世界拉出來，真實地從事專案實作或議題討論，體驗實踐的過程，這也是研究者 (即教學者) 的想培養學生的能力。至於面對一群時時刻刻與手機為伍的學生，如何帶著他們拿起不

擅長工具或親自做實驗找出問題的可能解答，都是身為教學者（即研究者）的挑戰。

● 研究議題的重要性與影響力

大學是國家最高的教育機構，擔負培育國家社會未來人才的重責，我們分析了世界經濟論壇的《就業前景報告》從 2015 年到 2025 年的變化，整理未來人才十項最重要的技能（資料來源：世界經濟論壇《就業前景報告》），發現 21 世紀人才所需的重要技能中，複雜問題的解決能力總是名列前茅，而因應數位科技的快速發展及後疫情時代，自主學習及學習策略、批判思考與分析能力、創造力等種種高階的綜合能力，都愈顯重要。然而這些能力又該如何培養？由 Bloom 的認知層次階段可知，創造力以及與其相關的問題解決能力，都屬於高階認知能力，也就是說，它必須肇基於知識的記憶、理解、應用，乃至於分析、評價，最後才能達到創造力的階層。因此創造力與問題解決能力這一類高度整合性的能力培養，需要有系統性、階層性的課程規劃，循序漸進的帶著學生一步一步往上爬。在每一個階段，預先了解學生可能遭遇的困難，打造合適的鷹架提供學生學習的輔助，如此方有可能將學生的認知層次提升，培養具有複雜問題解決及創造力的下一代人才。

物理結合了數字、基礎科學與生活應用，應該是訓練這個能力的最佳學科，然而在十二年國民基本教育的教學現場，因應升學考試的需求及計算跟批改的方便，學生們處理的問題多半有以下的特質：第一、許多參數皆以代號表示，過於抽象也跟生活脫節；第二、不強調數值計算的重要性，使得學生對物理量的大小、尺度沒有感覺。物理學研究的範疇從物質與能量、系統與尺度、交互作用、物體的運動定律，以及宇宙的演化。以尺度而言，涵蓋範圍小至原子核內中子、質子的大小（ 10^{-15} m），大至可觀測的宇宙大小（ 10^{26} m），這中間橫跨了 41 個數量級。以質量的觀點，從小至電子的質量（ 10^{-30} kg），到整個銀河系的質量（ 10^{42} kg），輕重之間差了 72 個數量級！因此要研究這麼廣的範疇內事物運作的規律，快速而合理的估算能力顯得相當重要，它協助我們大略判斷要找尋的物理量大概落在哪個範圍，好讓我們能依此設計研究範疇、選用合適的工具。而估算問題中最有名的就是費米問題了，費米問題的定義為：Estimation of rough but quantitative answers to unexpected questions about many aspects of the natural world. (Morrison, 1963)，其中廣為流傳的範例：「芝加哥這個城市裡有多少鋼琴調音師？」另外還包括諸如「人的體內有多少電子？」、「當你在室外時，每秒有多少光子進到你的眼中？」或「把地球的海水全部加熱到沸騰，需要多少能量？」這類的問題乍看之下有點不知所云，但仔細思考就可以發現，解決這類問題時需要用到的不只基礎知識，還包括各種生活常識及估計的能力。雖然估算的能力是如此重要，可惜的是，因為這類問題沒有「標準答案」，於是不會出現在考試評量的範圍內，所以老師不教、學生不學、學校不考。如此重要的能力我們不教，如何期待學生有競爭力？因此本計畫將針對教學現場面臨的問題，將 110 學期發展完成並實施一次循環的「融入量化估算內容」的普通物理課程，精緻化並修改相關的教材教法後，推廣至理工與非理工科系學生，試圖了解上述學生對於數字無感的原因，培養學生合理的數感，未來在面對跨領域問題時，能迅速有效地切入核心找到重點，進而提出有效的解決方案。

以下舉幾個學生在回答費米問題時常見的現象：

錯用公式、原理、概念：

計算加速度時，混淆「加速時間」以及「運動持續的時間」

使用「公轉」的週期公式計算地球自轉週期

混淆能量守恆，寫出不存在的「角動能守恆」公式

未釐清公式裡的 v 究竟為徑向速度還是切線速度

混淆能量、力、動量等不同概念
誤用理想「氣體」方程式來計算「固體」體積
認為常溫常壓下的空氣「氣體分子」與「固體」一樣緊密排列
...等

常識不足：

認為全世界有 13 億人(與中國混淆?)，或認為全世界目前有 140 億人
估計人呼吸一口氣的空氣體積有 500 公升之多！
認為人一分鐘呼吸 70 次是正常狀況
估計飛機的飛行速度有 300 km/s

對數字無感：

計算出一天有一億秒或 3600 秒而不自覺
每分鐘心臟打出來的血液中，紅血球只有 3000 個
人體能承受的加速度可高達 10 萬 g！

雖然申請人在規劃及執行時，對於學生的估算能力不足已有基本的認識及心理準備，因此在課程內容中強化了評估之訓練，也教導了適當的解題策略，然而仍有一定比例的學生產出相當離譜的數字而不自知，這中間遺落的環節究竟為何？從理解到應用的階段到底出了什麼問題？實在令人迫不及待地想知道答案，以及該如何修正教材教法來提升學習成效。

(2) 教學實踐研究計畫主題及研究目的

本計畫的研究主題為：提升量化估算能力的物理課程精緻化、推廣及成效評估

在 110 年計畫中發現大一普通物理課修課學生普遍的量化估算能力不足，以至於在實際應用物理原理時，無法做出合理快速的判斷，影響問題解決方案的有效性 & 品質，故研究者設計一系列融入課程的教學內容，提升學生的量化估算能力，打造有感的物理學習。並且將課程精緻化，推廣至非理工科系。

2. 研究問題 Research Question

本計畫的研究問題為，如何提升大一理工科系學生的量化估算能力？透過行動研究法，設計能提升量化估算能力的物理課程，予以精緻化後推廣，並進行成效評估。此研究問題仍聚焦於大學生所應具備的基本素養及核心能力，並發展教學策略及評量工具來達成。

由於 108 新課綱已經實施近三年，教育目標由最早的知識的取得、進化到九年一貫的能力指標取向，到現在的素養導向。而「核心素養」的定義，則是指一個人為了適應現在生活及面對未來挑戰，所應具備的知識、能力與態度。相較於課綱中揭櫫的學習內容多以 well-structured questions (problems) 來評量，本計畫以 ill-structured questions (problems) 來訓練學生的量化估算能力，剛好與新課綱相輔相成，也與核心素養精神不謀而合。

110 計畫的成果如下：

1. 設計 15 題不同物理觀念的量化估算問題並施測（示例附件一）
2. 訂出通用解題策略的評分規準（示例參考附件二）
3. 訂出例外解題策略的評分規準
4. 完成超過 500 份評量施測
5. 完成超過 500 份評量結果分析
6. 分析大一理工科系學生量化估算能力及習慣

7. 分析量化估算能力的變化以及其與學科成就之間的關係

110 年度即發現以下狀況：

1. 學生無法從記憶及理解的層次，跨到應用層面的主要因為：錯用公式、原理及概念；常識不足；數字無感。
2. 採用 IDEA(Identify, Develop, Evaluate, Assess)解題策略教學(Wolfson, 2021)，雖再三強調 Assess 步驟，但仍有部分學生無法建立 Assess 習慣、或 Assess 的能力不足。

本計畫所完成的工項目如下：

1. 蒐集新舊課綱下的大一理工科系學生量化估算解題方法及脈絡
2. 蒐集理工與非理工科系學生量化估算解題方法及脈絡
3. 施測~2000 份學習評量
4. 分析~2000 份評量結果

註、上述表列為完成工作項目，分析結果詳見“6.教學暨研究成果 Teaching and Research Outcomes”

3. 文獻探討 Literature Review

量化估算的問題中最有名的自然是費米問題，雖然費米是物理學家，但費米問題應用在教學上的研究，近年反而在數學教育上較為蓬勃。Albarracín (Albarracín, 2021)對國小二年級學童的研究顯示，學生在計算費米問題時，會嘗試自行建立數學模型，並有效將所學的數學知識與真實世界的現象連結。假如小學二年級的學童都能在訓練下，習得解決問題所需的相關技能，並能理解後應用，大學生應該也有機會成功，故我們的研究假設為：導入量化估算課程設計的大一普通物理課，應可有效提升學生的量化估算能力。由於對象為理工科系學生，我們也關心當前 STEM (Science, Technology, Engineering, and Mathematics)教育的現況，Holubova (Holubova, 2016)的研究歸納出以下結論：許多學生堅信所學的物理定律只能在實驗室中應用，或是僅適用於理想狀態，而不能應用在現實生活中。計畫主持人也發現，學生認為現實世界不可能沒有摩擦力，因此忽略摩擦力建立的模型，都不適用於現實生活，或者熱力學中的理想氣體方程式，僅適用於理想氣體，而在生活中因為理想氣體不存在，因此無法套用。這類的刻板印象使得學生無法將所學的物理知識和日常生活的應用結合、對於物理量的數值大小不關心也無感，因此，需要提出不同的教學方法來提升學生的量化及估計能力。Holubova 提到估算類的問題和費米問題能夠促進學生創造力發展，而 Ärleback 與 Albarracín (Ärleback, J. B., & Albarracín, L., 2017) 的研究也顯示，量化思考方式能提升 STEM 學生 21 世紀的競爭力。藉由解決費米問題，能夠增進學生估算能力、對於數字的數感、問題解決能力、以及建模能力，且解費米問題的能力並非與生俱來，需要透過訓練而得。Robinson (Robinson *et al.*, 2008) 對大學一年級學生進行實驗的結果指出，解決費米問題所需的技能，如量化思考與估計等能力，並不是大多數學生在高中時就已經掌握的技能，而是一項需要培養及發展才可獲得的能力，此研究結果與計畫主持人的經驗不謀合。我們初步分析 110 教學實踐研究所得到的數據顯示，學生在費米問題的表現，與學科成就之間沒有相關性或者呈現負相關（視題目而定，仍在分析中），這可能表示回答費米問題的量化估算能力，不是透過傳統的物理教學可得，這同時也加強了我們推動本計畫的決心。

量化估算能力又與問題解決能力息息相關，是所有大學生在面對二十一世紀必備的技能，因此儘早將其引入學習過程非常重要，一旦學生有足夠的經驗並了解老師或專家

如何解決問題，學生就可模仿並採用相同方式解決問題。Tretter 等人 (Tretter *et al.*, 2006) 與 Resnick 等人 (*et al.*, 2016) 的研究則指出專家與生手在解決尺度相關問題時，所使用的策略差異，這協助我們在設計課程單元時，引導學生從不熟悉的狀況藉由模仿漸漸靠近專家的策略與思維。另外，Pulgar 等人(Pulgar *et al.*, 2020) 的研究則顯示，在合作學習的環境中，學生在解 ill-structured problems 與 well-structured problems 時，使用不同的教學策略會導致不同的成效，這也是本研究在課程設計時須注意的面向之一。而培養量化能力除了能讓學生對於所算數字有感外，Chesnutt 等人(Chesnutt *et al.*, 2019) 蒐集美國小學與國中學生的州考成績(類似會考、學測成績等等大型測驗)進行研究，結果顯示學生的尺度概念(size and scale)能力與數學、科學成績有正相關性，對於尺度較有正確認知的學生、其數學及科學成績較佳。因此也許可以藉由提升學生的量化能力來提升其數學、科學能力。這就是為何本計畫希望將量化估算的內容融入普通物理課程，讓學生對所學物理知識有感的原因。

4. 教學設計與規劃 Teaching Planning

本計畫之研究主題為：如何提升大一理工科系學生的量化估算能力？研究內容及脈絡乃根據 110 年所調查出來的，學生在執行估算時的策略與困難，以及前導計劃導入的課程單元實施狀況為依據，提出修改後的課程設計，再次實施之後，分析學習成效，將課程再予以精緻化，並推廣到其他的理工科系以及非理工科系的學生。

教學方法為講授、研討(或分組討論)、實習/實驗、PBL/AL 教學等交叉應用，並引入較多以學生為中心 (student-centered) 的教學法，此法佔課堂時間總比例達 50% 左右。教學場域為大學課室與互動式科學演示中心教室。

各週課程成績考核方式 (評量工具) 詳見下表；

週	課程主題	內容【說明】	評量工具
1	課程介紹及分組	介紹本課程設計理念、課程要求、評量原則等。	
2	向量及數學工具+學習單元 #1	介紹座標系統與向量，比較向量及純量兩者的差異，向量符號的加減運算及內外積、微積分等工具。	量化估算能力評量學習單 #1(中大校園_示範)
3	運動學+學習單元 #2	介紹位置、速度、加速度等用來描述運動的基本概念，及等加速度運動，包括物體受重力作用在地表附近的移動。	量化估算能力評量學習單 #2(爆米花)
4	力與運動+學習單元 #3	介紹牛頓的三大運動定律，以及力、質量的概念與加速度的關係。	量化估算能力評量學習單 #3(手機)
5	二維運動+學習單元 #4	講授如何將位置，速度和加速度用向量表達，介紹等加速度圓周運動。	量化估算能力評量學習單 #4(牙線越獄)
6	質點力學+學習單元 #5	介紹如何從系統的質心開始研究由兩個或更多個粒子組成的系統，及兩物體的碰撞。	量化估算能力評量學習單 #5(呼吸)

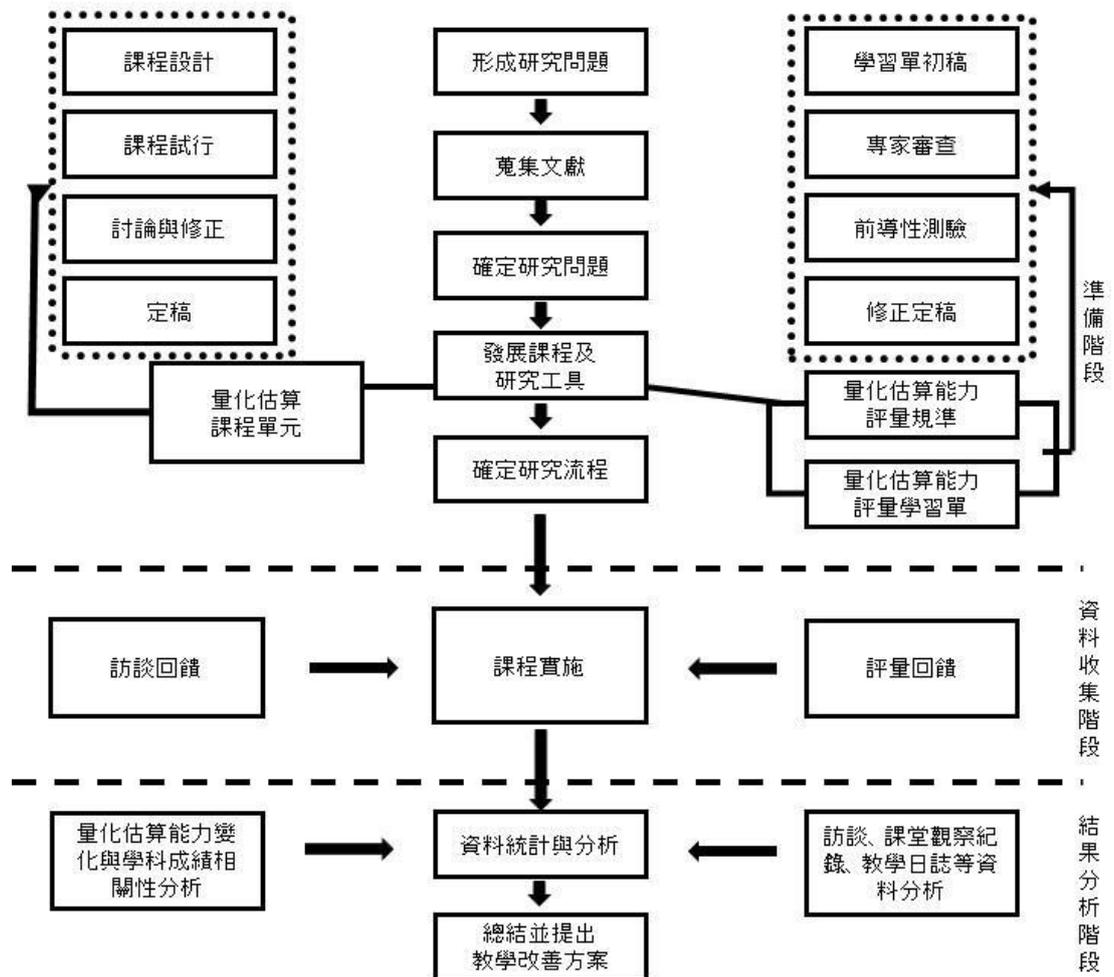
7	功與能+學習單元 #6	介紹功的概念以及其與能量的關係，並利用向量內積計算作功，以及功率與能量之間的差異。	量化估算能力 評量學習單 #6(紅血球)
8	能量守恆+學習單元 #7	介紹保守力及非保守力，講授重力和彈力位能的表達式，及如何使用力學能守恆來解決較複雜問題。	量化估算能力 評量學習單 #7(水平加速度)
9	期中考	期中考	
10	轉動運動+學習單元 #8	介紹角位置、角速度、角加速度和轉動力矩，及如何通過積分計算不同形狀物體的轉動慣量。	量化估算能力 評量學習單 #8(戰鬥機)
11	力矩與角動量+學習單元 #9	如何使用外積計算力矩，介紹角動量的定義以及其守恆的條件，介紹角動量守恆所導致的特殊現象，進動現象。	量化估算能力 評量學習單 #9(暴龍)
12	震盪系統 +學習單元 #10	介紹震盪系統如何發生，及簡諧震盪的週期關係，及其應用。	量化估算能力 評量學習單 #10(垂直加速度_人)
13	力學波及聲波 +學習單元 #11	如何用方程式描述波動，駐波的形成原因，及聲波大小分貝定義。	量化估算能力 評量學習單 #11(垂直加速度_貓)
14	溫度與熱 +學習單元 #12	介紹熱力學中的基本名詞，溫度、熱和熱平衡，以及熱是如何傳遞，透過熱傳遞計算出物體的比熱。	量化估算能力 評量學習單 #12(垂直加速度_跳蚤)
15	熱力學第一定律 +學習單元 #13	介紹熱力學第一運動定律，計算理想氣體變化量下所需的功，介紹基本熱力學過程所需的功和熱量：等溫，等壓，恆定體積和絕熱。	量化估算能力 評量學習單 #13(煮沸海水)
16	entropy+學習單元 #14	介紹 entropy 定義來源，及 entropy 是如何影響熱力學的第二定律。	量化估算能力 評量學習單 14(喝水量)
17	熱力學第二定律+學習單元 #15	介紹熱力學第二定律，以及熱力學第二定律是如何限制了我們從熱能中提取有用功的能力。	量化估算能力 評量學習單 #15(水力發電)
18	期末考	期末考	

學習成效評量工具為自編的「量化估算評量規準」、「量化估算評量學習單」15份、學生訪談及質性資料分析。評量規準及學習單的內容，將依過去實施的經驗及專家審查意見修訂後實施。15份量化估算能力評量學習單，依據解題所包含的能力區分為3類：生活類、物理基礎類、物理進階類，難度等級分別定義為一到三級。分類原則如下表：

知識類別	所需		
	生活常識	基礎物理知識	進階物理知識
生活類	✓		
物理基礎類	✓	✓	
物理進階類	✓		✓

5. 研究設計與執行方法 Research Methodology

(1) 研究架構



(2) 研究範圍

本研究實施的課程範疇為：111 學年度「普通物理」，內容涵蓋運動學、力學、波動物理、流體、熱力學。教材選用包括 Essential University Physics (Wolfson, 2021)、自編教材、<http://phy.tw> 網站、物理演示實驗等。評量工具包括自編的費米問題學習

單，參考來源為知名物理教學期刊 *The Physics Teacher* 中的專欄 "Fermi Questions"。藉由上學期計畫階段性結果與發現，調整課程中與量化思考相關的教材教法。除普通物理外，在 111-2 學期於核心通識課：「生活中的物理學」與「物理之美」試行，課程內容範圍為食、衣、住、行、育、樂各領域相關的物理現象，並以上學期發展的評量規準及學習單內容，進行量化思考學習成效的評量分析，將非理工科系學生與理工科系的學生表現比較。

(3) 研究對象與場域

本研究實施的場域為一般綜合型大學，授課對象為理工科系學生，學生人數為 55 人，每周上課的時數為 4 小時，含 3 小時授課及 1 小時習題課。課程名稱為普通物理，為大一理工科系學生的共同必修課，實施的科系將普通物理列為一學期必修。本研究課程實施及資料蒐集期間以 111 學年度上學期為準。在 111 學年度下學期，擷取上學期在理工科系普通物理課實施的研究成果，在通識課理工與非理工科系的學生族群測試，研究對象為一般綜合型大學理工科系學生與文法商管各科系學生，年級由大一至大四不等，人數分別為 26 與 44 人，蒐集的資料可做為推廣本研究的提升量化思考能力教材教法的參考。

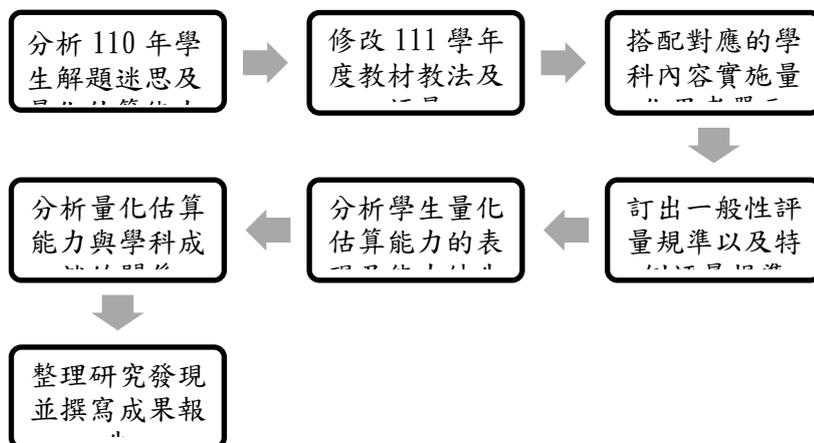
(4) 研究方法與工具

本研究之目標是提升量化估算能力的物理課程精緻化、推廣並進行成效評估，研究方法為行動研究法，採用文獻探討、實地觀察、訪談、成就評量、教學日誌、研究者自我反思等方式來進行。研究工具為自編的費米問題學習單、自編的量化估算表現評量規準、質性資料等。資料分析的結果用來回應本研究所發展的融入量化估算內容的普通物理課程，是否能有效提升學生的估算及量化能力。除分析理工科系的學生學習表現及解題策略外，進一步分析非理工科系的學生的學習表現及解題策略差異。

(5) 資料處理與分析

本研究計蒐集的資料有教學日誌、研究者自我反思紀錄、訪問調查資料、學習評量資料。其中教學日誌、研究者自我反思紀錄、訪問調查資料以圖文紀錄方式整理歸納；學習評量資料將建立評量規準(Rubrics)後，轉換為量化資料進行統計分析。

(6) 實施程序



6. 教學暨研究成果 Teaching and Research Outcomes

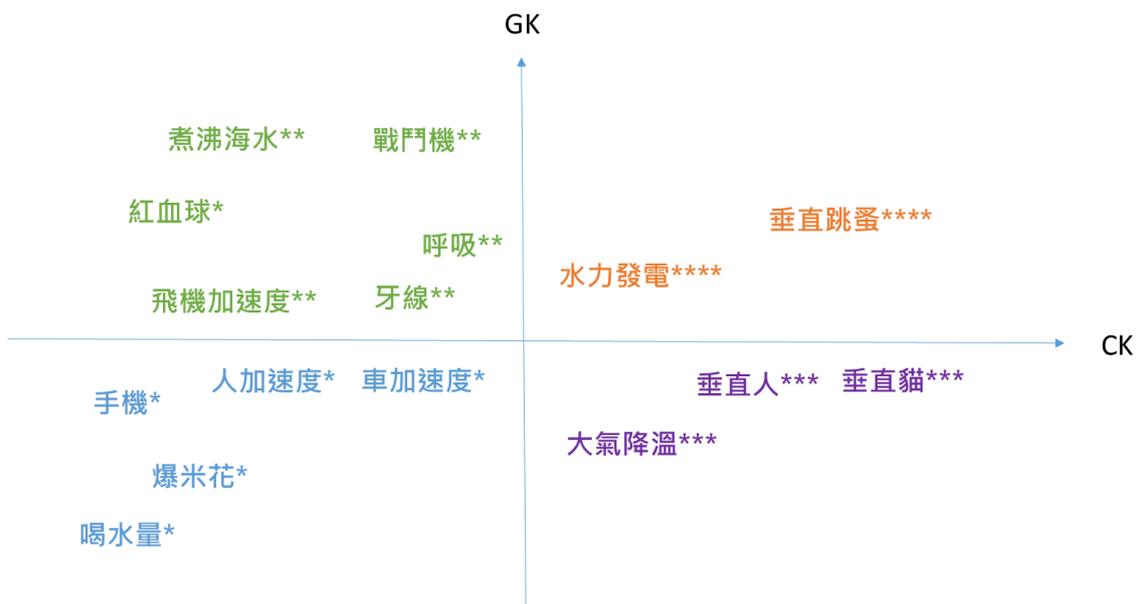
(1) 教學過程與成果

◆ 設計課程單元與學習單與評分

參考 110 學期計畫執行結果，規劃共 15 題量化估算題以學習單方式讓學生獨立作答，各題作答時間約為 10~15 分鐘。詳細的題目及施測時間詳見“三. 附件 Appendix”。15 題費米問題依照題目所需使用公式、參考依據需具備的科學知識含量深度與多寡，分為生活類、基礎科學類、進階科學類，各類型學習單範例如表一，並預估各題的難度分布，如圖二。15 題中，一題為示範題不計分，另外在正式施測前預試後刪除 2 題，及刪除在 110 學期計畫執行後判定為不適用題，其中有 3 題為題組各有 2、3、3 小題，故學生施測的總小題數為 $15-1-3+5=16$ 題。參考相關論文後訂出評分規準，並將評分內容分為數值部分、推理部分，兩部份得分各佔 50%。批改前會將同一份問卷交給三位批改人員批改確認標準一致，再進行後續批改多份問卷，以避免不同批改人員造成標準不一致。

表一、三類型學習單例子

生活類	估計裝滿一間高中教室（空教室）需要多少顆爆米花？
	估計全世界有多少人「正在」使用手機？
基礎科學類	估計每分鐘有多少空氣分子吸入你的肺中？
	煮沸所有的海水需要多少能量？
進階科學類	跟自己的身長相比，跳蚤可以跳得非常「高」。估計人、貓、跳蚤跳躍時，加速度大約？g
	研究發現，人類的平均體溫已經從過去的 37.0°C ，下降到現在的 36.4°C 。為了減緩全球暖化的趨勢，有人提出這樣的假設：想辦法讓全體人類從大氣中吸收熱能，使平均體溫回到 37.0°C ，藉此讓大氣降溫。請估算此過程能讓大氣降溫幾度？

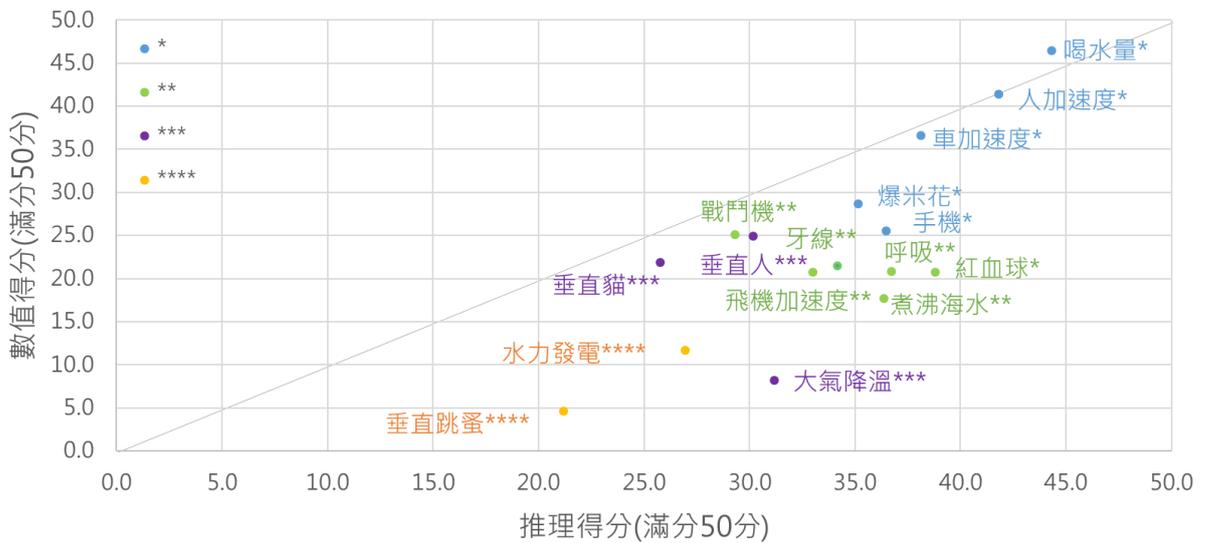


圖二、預估難度分布，GK 表示常識；CK 表示知識，*數表示難度(愈多愈難)

◆ 教學成果

I. 調查理工科系學生之量化估算能力及習慣

學生作答分數與難度如圖三，分數落於右上角表示學生表現較好，反之則會位於左下，與先前預估各題難度(圖一)大致符合，若在圖表上標示出斜率為“1”的斜直線，可發現各題得分點多位於斜線右下區，代表學生推理表現優於數值表現。同時發現大一理工科系的學生，面對較為熟悉的標準類物理問題時，表現反而優於生活化題目。



圖三、學生作答分數與難度關係

II. 探討學生量化估算問題的三個分類間，推理、數值的關係，以及其與學期成績間的關聯

a. 推理、數值的相關性

將所有學生的推理、數值分數進行相關性分析(如表二)，發現多數題呈現顯著正相關(顯著性<0.05)與 110 學期發現結果相似。意即推理的分較高的同學，在數值得分也會較高，反之亦然。另外，沒有呈現顯著正相關的題目，經分析其屬性，推測原因可能是推理分數已達天花板，以至於缺乏鑑別率；但數值分數仍具鑑別率，導致彼此呈現無相關性。

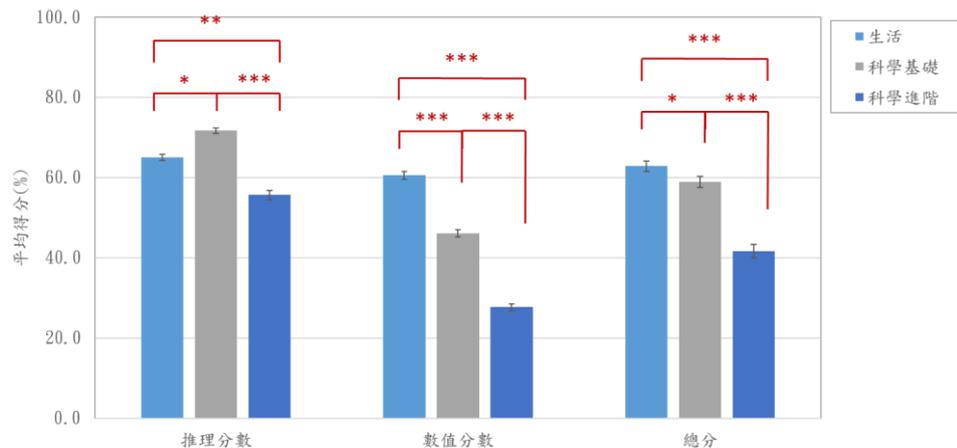
表二、兩學期推理得分與數值得分相關分析

題目	110 學期		111 學期	
	Pearson 相關	顯著性	Pearson 相關	顯著性
喝水量	0.196	0.151	-0.22	0.109
爆米花	0.294*	0.036	0.820***	0.000
手機	0.344*	0.013	0.145	0.314
牙線	0.451**	0.001	0.432*	0.040
呼吸	0.498**	0.001	0.336*	0.017
水平加速度(人)	0.001	0.995	0.026	0.855
水平加速度(車)	0.26	0.096	0.174	0.217
水平加速度(飛機)	0.332*	0.038	0.458**	0.001
紅血球	0.556***	0.000	0.173	0.220
戰鬥機	0.475**	0.001	0.283	0.054

垂直加速度(人)	0.718***	0.000	0.552***	0.000
垂直加速度(貓)	0.785***	0.000	0.735***	0.000
垂直加速度(跳蚤)	0.220	0.161	0.304*	0.030
煮沸海水	0.349*	0.024	0.390*	0.004
大氣降溫	0.386*	0.012	0.648***	0.000
水力發電	0.707***	0.000	0.445*	0.002

b. 生活類、科學基礎、科學進階三類別間，學生表現的比較

將三個類別的分數利用統計軟體 SPSS 進行成對樣本 t 檢定分析(如圖四)，發現在推理部分科學基礎顯著高於生活類，但數值部分則相反，表示學生在熟悉的標準類物理題目類型的推理表現較優秀，但對於數值方面，學生還是更擅長估算在日常生活中所會使用到的數值。而科學進階類型皆顯著低於其他兩類，表示在需要具備進階物理知識及需活用物理公式的題目學生缺乏相關訓練而表現較差。



圖四、生活類、科學基礎、科學進階三類別間的分數比較

c. 推理、數值分數與學期成績的相關性

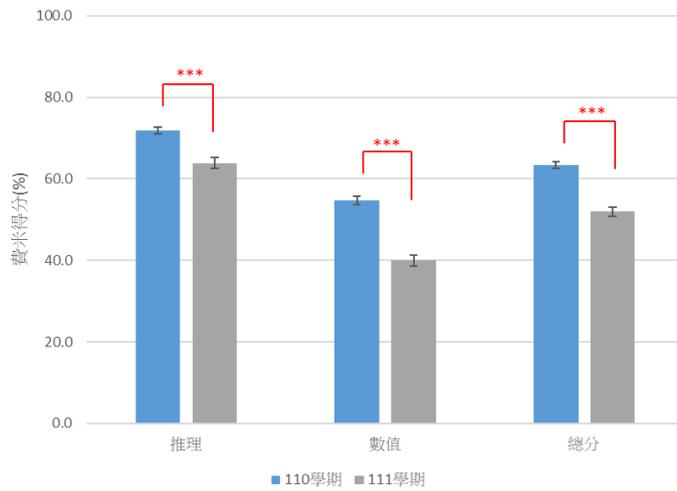
經過相關分析後發現，111 學年量化估算問題得分與學科成績間具有顯著正相關，如表三所示。意即在量化估算問題表現優異的同學，在學科成績上的表現也會比較好，反之亦然。

表三、推理、數值分數與學期成績相關分析

相關係數	平時週考	期中考	期末考	學期總分
量化估算 推理	0.545***	0.518***	0.444*	0.65***
量化估算 數值	0.519***	0.31*	0.115	0.394**
量化估算 總分	0.603***	0.471***	0.32*	0.594***

III. 110 學期與 111 學期比較

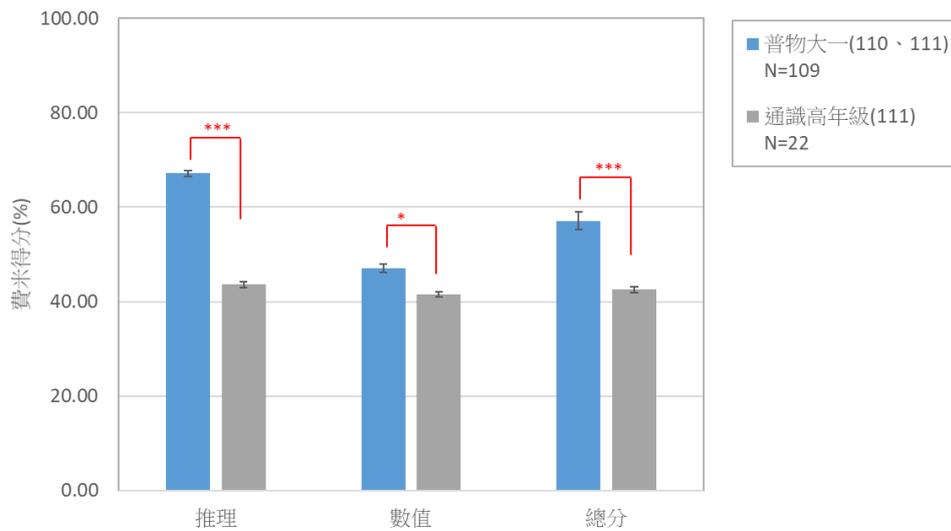
將兩學年量化估算成績做獨立樣本 t 檢定(如圖五)，發現 110 學年推理與數值成績均顯著高於 111 學年，代表 111 學年理工科系學生表現不及 110 學年學生，是否因新課綱導入，使得物理授課時數縮減，基本訓練不足所導致，則有待進一步的探討。



圖五、兩學期得分比較

IV. 大一 STEM 學生與高年級 STEM 學生量化估算問題得分分析

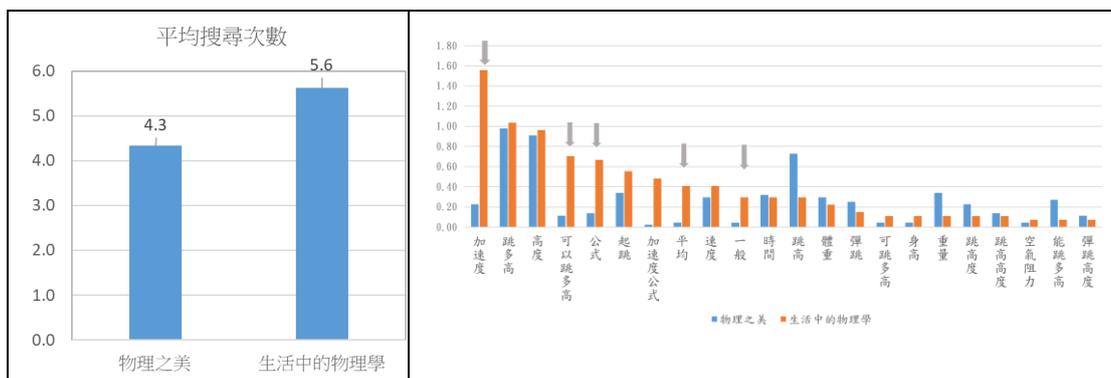
從 16 題量化估算問題中，挑選 5 題具代表性題目於 STEM 通識課施測，分析其中高年級學生(N=22)與兩學期普物大一學生(N=111)得分。因人數小於 30 人，使用獨立樣本 Mann-Whitney U test(如圖六)，發現普物大一學生的得分顯著高於通識課高年級學生，表示未經訓練的理工科系學生，即便是高年級，其量化估算能力不如經過訓練的大一理工科系學生。



圖六、普物大一與通識高年級量化估算得分

V. 理工與分理工學生估算策略不同

110 下半學期因疫情影響，使用線上授課，將量化估算問題改為可上網查詢資料。以垂直加速度問題分析兩班通識課：STEM 物理之美(n=45)、non-STEM 生活中的物理學(n=29)。其中發現 non-STEM 學生平均搜尋關鍵次數大於 STEM 的學生(如圖七)。將搜尋關鍵字的出現次數除以班級人數(如圖八)，發現搜尋加速度、速度、公式等關鍵字次數 non-STEM 學生高於 STEM 學生。而 non-STEM 學生傾向使用完整句子搜尋，如：「貓可以跳多高」，以及使用「平均」、「一般」等形容詞。「高度」與「跳多高」關鍵字在兩班學生平均所使用的次數大致相同。表現出 STEM 與 non-STEM 在量化估算問題所使用的策略差異。



圖七、平均搜尋次數

圖八、尋關鍵字的出現次數/班級人數

(2) 教師教學反思

執行計劃最大的挑戰是來自於，面對一群剛進大學的學生，他們一方面要適應全新的環境與生活；一方面又要接受這種不熟悉的量化估算訓練，這樣的壓力會影響學生寫學習單的態度，有些學生到了學期後 1/3 漸露疲態。所以雖然這樣的訓練的確強化了學生的能力，但實施過程可能要調整「力道」，以免學生未蒙其利先受其害。

從量化估算能力與學科能力的關聯性分析中發現，110 學年度為無相關，到了 111 學年卻呈現正相關；加上 110 學年的學生表現的確優於 111 學年的學生，這背後的原因究竟是隨機誤差？還是新、舊課綱交替？還是有其他的原因，有待進一步探究。

(3) 學生學習回饋

授課班級對於訓練量化估算問題的看法

1. 日常生活中，你可能就會有一些不一樣的 sense 或是不同的感觸，在面對這種數字數據型的常識的問題就比較不會那麼怕。
2. 我覺得經過測試一系列(量化估算問題訓練)，我會在特別對於周遭事物會有點留心就是會稍微更去注意周遭的事物的變化。
3. (量化估算問題訓練)能把一些你以前學到的東西和生活中做連結。

7. 建議與省思 Recommendations and Reflections

- ◆ 考慮補助多年期計畫，有利於產出優秀的教學實踐研究成果
- ◆ 審查時做出區別，在經費上鼓勵優秀的、有潛力的計畫
- ◆ 探討私立大學與國立大學的計畫送件數差異來源

二. 參考文獻 References

(採 APA 格式羅列)

Albarracín, L. (2021). Large number estimation as a vehicle to promote mathematical modeling. *Early Childhood Education Journal*, 49(4), 681-691.

Anderson, L. W., Krathwohl, D. R., Airasian, P. W., Cruikshank, K. A., Mayer, R. E., Pintrich, P. R., ... & Wittrock, M. C. (2001). A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives, abridged edition. *White Plains, NY: Longman*, 5(1).

Anderson, L. W.(Ed.),Sosniak, L. A.(Ed.)(1994).*Bloom's taxonomy : A forty-year retrospective*.Chicago, IL:The National Society for the Study of Education.

Bloom, B. S.,Hastings, J. T.,Madaus, G. F.(1971).*Handbook on formative and summative evaluation of student learning*.New York:McGraw-Hill.

Bloom, B. S.(Ed.),Engelhart, M. D.,Furst, E. J.,Hill, Walker H.,Krathwohl, D. R.(1956).*Taxonomy of educational objectives (The classification of educational goals) : Handbook 1: Cognitive domain*.London:Logman.

Ärlebäck, J. B., & Albarracín, L. (2019). The use and potential of Fermi problems in the STEM disciplines to support the development of twenty-first century competencies. *ZZDM*, 51(6), 979-990.

Chesnutt, K., Jones, M. G., Corin, E. N., Hite, R., Childers, G., Perez, M. P., Cayton, E., Ennes, M. (2018). Crosscutting concepts and achievement: Is a sense of size and scale related to achievement in science and mathematics? *J Res Sci Teach*. 2018;1–20.

Holubova, R. (2017, January). STEM education and Fermi problems. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1804, No. 1, p. 030001). AIP Publishing LLC.

Hiatt, Ann. (2021, Nov. 2). Jeff Bezos hired this Amazon applicant 'on the spot'—here are the 2 interview questions he asked. [Online] Available: <https://www.cnn.com/2021/11/02/job-interview-questions-jeff-bezos-asked-a-former-amazon-employee-before-hiring-her-on-the-spot.html> (Dec. 10, 2021)

Morrison, P (1963) Fermi Questions *Am. J. Phys.* 31, 626.

Premsky, M. (2001). Digital natives, digital immigrants part 2: Do they really think differently? *On the horizon*.

Pulgar, J., Candía, C., Leonardi, P. M. (2020). Social networks and academic performance in physics: Undergraduate cooperation enhances ill-structured problem elaboration and inhibits well-structured problem solving. *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* 16, 010137.

Resnick, I., Davatzes, A., Newcombe, N. S., & Shipley, T. F. (2017). Using relational reasoning to learn about scientific phenomena at unfamiliar scales. *Educational Psychology Review*, 29(1), 11-25.

Robinson, A. W. (2008). Don't just stand there—teach Fermi problems!. *Physics Education*, 43(1), 83.

Tretter, T. R., Jones, M. G., Andre, T., Negishi, A., Minogue, J. (2006). Conceptual Boundaries and Distances: Students' and Experts' Concepts of the Scale of Scientific Phenomena. *J Res Sci Teach* 43: 282–319, 2006.

Weinstein, L. (2007). Fermi Questions. *The Physics Teacher*, 45(6), 390-390.

Wolfson, R., *Essential University Physics*, 4th ed. (Addison-gsgsWesley, San Francisco, CA, 2021).

三. 附件 Appendix

附件一、最終採用的量化估算問題

- Q.1【校園】估計，XX 校園所有戶外空間可以站多少人？(人)
- Q.2【爆米花】估計裝滿一間高中教室（空教室）需要多少顆爆米花？(顆)
- Q.3【手機】估計全世界有多少人「正在」使用手機？(人)
- Q.4【越獄】囚犯想用牙線支撐自己體重越過監獄圍牆，估計他需要幾盒牙線？(盒)
- Q.5【呼吸】每分鐘有多少空氣分子吸入你的肺中？(個)
- Q.6【紅血球】你的心臟每分鐘送出的血液中，有多少個紅血球？(個)
- Q.7【加速度】估計行人由靜止到等速行走、汽車由靜止到等速在高速公路、客機由靜止到起飛過程的加速度大小（m/s）
- Q.8【加速度】跟自己的身長相比，跳蚤可以跳非常「高」。估計人、貓、跳蚤奮力跳躍時，加速度大約？(g)
- Q.9【戰鬥機】飛行員旋轉飛行時會承受 g force(因為向心加速度)，所以飛行員生理上可以承受的飛行最小迴轉半徑是？(m)
- Q.10【移民火星】假如地球 80%的人全部離開地球移民火星，則地球的軌道將因此靠近（或遠離）太陽多少距離？(km)
- Q.11【行星撞地球】估計一顆直徑 10 公里的小行星撞到地球後，地球的自轉週期會改變多少？(秒)
- Q.12【暴龍】暴龍走路的速度？(m/s)
- Q.13【煮沸海水】煮沸所有的海水需要多少能量？(kCal)
- Q.14【水力發電】(a) 全台灣的人一年喝掉多少水？(公升) (b) 全台灣的人一年用掉的電如果全部來自於水力發電，需要多少水？(公升)
- Q.15【大氣降溫】研究發現，人類的平均體溫已經從過去的攝氏 37.0 度，下降到現在的攝氏 36.4 度。假如我們有辦法讓人類從大氣中吸收熱能，使得平均體溫回到攝氏 37.0 度，或許可以減緩全球暖化的趨勢。請估算此過程能讓大氣降溫幾度？(度)

其中，

Q.1~Q.6 為生活類，需要用到的資訊為基本常識，例如、全世界的總人口數；

Q.7, Q.9, Q.10, & Q.13 為物理基礎類，需要用到物理基礎概念（以前學過的或簡單的），例如、加速度的定義、等加速度運動、圓周運動的向心力等；

Q.8, Q.11, Q.12, Q.14 & Q.15 為物理進階類，需要用到物理進階概念（新學的或以前學過但複雜的概念），例如、地球上空氣的總質量、複擺的震盪週期、人體的比熱等。

附件二、量化估算問題評分規準(Rubrics)舉例

說明：評分分為兩個向度來執行：「推理」(reasoning)及「數值」(numerical)，各佔 50%，分數最後會標準化為滿分 100 以分析比較。

以下題為例、

【爆米花】估計裝滿一間高中教室（空教室）需要多少顆爆米花？（顆）

給分原則

		配分(滿分)	備註：
推理	公式	0,2	教室體積/爆米花體積
	推理依據(anchor1)	0,1,2	高中教室體積來源
	推理依據(anchor2)	0,1,2	爆米花體積來源
數值	數值 1	0,1,3,5	高中教室體積數值
	數值 2	0,1,3,5	爆米花體積數值
	數值 3	0,1,3,5	裝滿教室所需爆米花數值=數值 1/數值 2

數值部分給分標準：

	單位	倍率	Best estimation	1 分	3 分	5 分	3 分	1 分
高中教室邊長 (參考值,不列入計分)	m	1.5	10	無	4~7	7~15	15~22	無
高中教室高度	m		3.5	無	無	無	無	無
高中教室體積	m ³	2	350	無	$5 \times 10^1 \sim 1 \times 10^2$	$1 \times 10^2 \sim 8 \times 10^2$	$8 \times 10^2 \sim 2 \times 10^3$	無
爆米花邊長 (參考值,不列入計分)	cm	1.5	1.5	0.4~0.6	0.6~1.0	1.0~2.0	2~3	3~5
爆米花體積	cm ³	3	3.375	$3 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$	$2 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$	$1 \times 10^7 \sim 6 \times 10^8$	$6 \times 10^8 \sim 3 \times 10^9$	$3 \times 10^9 \sim 1 \times 10^{10}$
爆米花個數	個	5	1×10^8					