

1998 年第 29 屆國際物理奧林匹亞 競賽試題評析

林明瑞
國立臺灣師範大學 物理系

本屆試題主要由冰島大學負責提供。理論試題共有三大題，每大題 10 分，共計 30 分，涵蓋力學、熱學、和近代物理（天文學）；實驗試題僅有一個大題，分成二個部分，共計 20 分，測驗電磁學的基礎知識、實驗技巧、數據處理、和測量準確度。全套試題的配分如下：力學佔 30%，熱學佔 10%，近代物理（天文學）佔 20%，電磁學（實驗）佔 40%。就試題的涵蓋面而言，雖然少了光學和量子物理，但這套試題頗有力道，橫跨四大領域，相當可觀。下面就各題的內容評析如下：

一、理論試題

1. 理論第一題：

本題分析正六角柱在斜面上的滾動過程。當六角柱剛體在斜面上滾動時，其柱面邊緣的稜線按序逐次地碰撞斜面。在每次碰撞斜面的瞬間，六角柱就開始以新碰觸的稜線為軸，繞其轉動。因此六角柱在斜面上的運動為一不均勻的滾動。這種滾動和一般圓柱在斜面上的純滾動不同，前者僅以柱面的稜線和斜面接觸，伴隨一次又一次的碰撞，其繞稜線轉動的運動方程式只能離散地個別處理；後者則柱面上的所有點皆連續地和斜面接觸，因此其運動方程式可用微積分列式。

本題含有(1)至(5)五個小題，逐題評析如下：

- (1) 要求解出六角柱在以新稜線碰撞斜面之前和之後的角速率比值。本小題解題的關鍵點在於知道六角柱的質心速度必定垂直於質心至轉軸(即稜線)的垂直線段。其次在於理解六角柱從對某一條稜線的轉動，到對下一條稜線轉動的碰撞過程中，由於碰撞過程的時間極短，所以六角柱對同一稜線轉動軸的角動量守恆。這個小題可說是解開本大題的門鑰，若能開啓，餘下各小題當能一一迎刃而解。本小題配分為 3.5 分，可見命題者的重視。
- (2) 求解六角柱在以新稜線碰撞斜面之前和之後的總動能比值。本小題的目的在引導學生知道六角柱在每次碰撞時均伴隨有動能的損失，以作為後續小題的準備。但解本小題時，和是否解出(1)小題無關，學生只需知道六角柱的總動能和其角速率的平方

值成正比，便可立即解出。這一小題的配分只有 1.0 分，顯見其簡單。

- (3) 要求解出為使六角柱能進行下一回合的翻轉，則所需的最小動能為何？這一小題仍然在引導學生延續上兩小題的思考。當六角柱開始以新稜線為轉軸時，其對應的柱面平貼斜面。若欲使六角柱能繼續翻轉，則此柱面勢必離開斜面，而使六角柱的質心升高，因此必須有足夠的動能來提供由於質心升高所增加的位能。這一小題看起來，原理甚簡單，但是學生必須能知道質心的最高位置，正確畫出這時六角柱和斜面間的幾何關係，否則不易求出柱面應轉過的角度或質心升高的距離。這一小題的配分為 1.5 分，和(2)小題相較，可稱允當。這一小題的求解和前兩小題並沒有連鎖的關係。
- (4) 假設在滿足(3)小題的條件情況下，即六角柱可以在斜面上持續翻轉，則最後的動能值會趨近於一極限值，則此值應為多少？試題中不要求學生證明極限值的存在，已降低了本小題的難度。從(a)小題中可得知六角柱每換一個稜線轉動軸，其動能便因碰撞而減少一些。但是若六角柱能繼續翻轉，則從原先六角柱的某一個與斜面平貼的柱面，轉成下一個新柱面，則其質心位置亦隨之下降，即六角柱的位能減少。如果因位能的減少而增加的動能，剛好抵銷因碰撞而損失的動能，則六角柱的動能當能維持一定值，此定值即為所求的極限值。本小題的計算式並不複雜，但要列出正確的數學式，則須要相當強的邏輯推理能力。本小題配分 2 分，比重甚大，學生的物理能力高低可從此小題判知。
- (5) 是本大題的總結小題—欲使六角柱能在斜面上不斷地滾動下去，則斜面的傾斜角至少應若干？從(3)小題中可知使六角柱能夠翻轉的最小動能；從(4)小題可知六角柱在斜面上持續滾動時的極限動能，因此兩者合併考慮便可解出斜面的最小傾斜角。本小題配分 2 分，和前兩小題稍有連鎖關係。

由以上的分析可知，這五小題雖然題題相關，但並非環環相扣。前題解不出，並不影響後題的求解，這正是命題技巧的高明所在。本題雖然屬於「古典型」的力學試題，但有異於一般習見的轉動問題，足以考驗學生對剛體運動的理解程度。這是一道區別能力甚佳的題目，雖然創意稍弱，但命題技巧則可圈可點。

我國五位學生在這一題的平均得分為 6.7 分，其中有一位學生獲得滿分，兩位獲得 9.0 和 9.1 的高分，但另兩位則得分不佳。

2. 理論第二題：

本題分析南極冰帽底下因火山爆發而致熔冰的問題。近幾年來國際合作的科學研究團隊，在南極原本平坦的冰原上發現有如火山口似的圓錐形凹陷(中央下陷的深度約有

100 公尺)，推測是由於冰帽底下有火山爆發所致。火山噴出的岩漿熔穿冰帽的底層，熔冰產生的水有一部分流失，剩餘的部分則因達成靜液平衡而留存在冷卻岩漿的上方，因此造成冰原表面的凹陷。本題要求學生從冰原上所能測量的圓錐形凹陷的深度，推算出冰帽底下岩漿突起的高度，積存在岩漿上方的水容量和形狀，以及流失的水量。這一道題極富創意，結合理論和實際，把當前的科學前沿研究主題改編成競賽試題，這也是這十幾年來國際物理奧林匹亞競賽的命題趨勢。本題共分成(1)至(4)四個小題，評析如下：

(1)根據已知的數據，計算冰帽每年熔化掉的厚度。雖是簡單的計算，但仍具有物理意義。由計算的結果得知地球表面向外的熱流量每一年僅將冰帽熔化掉 6 毫米的厚度，表示冰帽上層的凹陷和這種熱流量無關。本小題配分僅 0.5 分，可算是基本得分。

(2)是作為後續求解實際問題的預備題或引導題。本小題假設一具有平面表面的冰帽，靜置在一地表斜面上，冰帽上表面和水平面之間的夾角為 α ，地表斜面的傾斜角為 β 。因為冰帽底部的冰受熱熔化，在其底面和地表斜面之間形成水層，當水層達成靜液平衡時， α 和 β 之間的關係式為何？這個關係式是後續兩題的解題關鍵所在。若(2)題未能解出，那麼在餘下的二小題中只能爭些零碎的分數了。本小題所解出的 α 角竟然是負角，頗出一般的直覺意料之外，即冰帽的上表面既不是平行於地表的斜面，也不是沿著水平面，而是向下傾斜的平面。本題的解法說起來相當直接。首先計算冰帽本身壓在水層上某一處的壓力，然後單單計算斜向的水層在同一處的靜液壓力，使這兩個壓力相等，便可解出所求的關係式。前者的壓力可輕易算出，但後者壓力的計算則須要一些物理頭腦，能抓到斜向水層的靜液平衡問題。這一題隱含著物理玄機，即使學生解出了 α 和 β 之間的關係式，他還必須能理解出 α 角為負角的物理意義。如果不加細察，粗率地把兩個角度都當作正角處理，那真是失之毫厘，謬以千里了！本小題配分 3.5 分，比重甚大，可說是在考驗學生對物理的分析和判斷能力。

(3)是(2)小題所得關係式的直接應用，也是用來引導求解(4)小題。在此題中冰帽下方的圓錐形水體，其作用和(2)題中夾於冰帽底面和地表之間的斜向水層相同，同樣會造成冰帽上表面的凹陷。冰帽上表面的向下斜角 α 取決於冰帽底面的向上斜角，和水體下的地表無關。本小題配分 1 分，和(2)題具有連鎖性，考較學生的應用能力。如果學生頭腦不夠靈光，就算是解出了(2)題，未必能正確地應用到本題。

(4)是本大題的核心部分。利用(2)題的關係式和(3)題的結果，來分析南極冰帽底下因火山爆發所造成的上表面凹陷問題。岩漿熔冰的過程可細分成三個階段：第一階段是

岩漿把和其同體積同形狀的冰融化成水。但由於尚未達到靜液平衡，所生成的水都會流失；第二階段是岩漿的溫度仍高，繼續熔冰，所生成的水繼續流失，一直到達成靜液平衡時為止；第三階段是岩漿的溫度尚未冷卻至 0°C ，因此繼續熔冰，但是因為水體已達成靜液平衡，所以熔冰產生的水不會流失，而累積在岩漿圓錐體的上方。如果在試題中對這些熔冰的過程一字不提，要學生在有限的數小時內自行想出，顯然是超難。命題者顧慮周詳，在試題中放入若干引導性的文字敘述，但僅點到為止，以考驗學生是否能深入分析。本小題配分 5 分，佔了全題的一半分數。

本大題基本上只是(2)小題中所得平衡關係式的重複應用，所涉及的計算也僅限於代數的演算而已，但是所要求的推理和分析能力卻是層層加深。可以解出本題的學生，其在科學思考的能力應可列為上等了。對於本大題的設計，我應給予高度的評價。這是一道難得的上佳試題，不但挑戰性強，區別能力高，而且也非常富於教育性，使學生能充分欣賞到物理知識的價值，從簡單的物理定律竟然可以推知自然現象的變化過程。

我國五位學生在這一題的平均得分為 5.2 分，其中有一位學生獲得 9.9 分，接近滿分，使我們頗感欣慰；其餘同學的得分則不甚理想，卻令我們心憂國內中學的物理教學方式，是否有助於培養學生分析問題的能力？

3. 理論第三題：

本大題改編自 1994 年發表在 Nature 科學期刊上的天文學論文，探討地球上所見的星體速率是否真的超過光速？這是一個非常有趣的問題，也是一道理論和實際結合的實例。表面上看起來好像是有關相對論的試題，實際上是天文觀測數據的理論解釋，分析視速率和真正速率的關係，並不涉及相對論的理論演算。本題共分成(1)至(6)六個小題，評析如下：

- (1) 要求學生根據無線電天文望遠鏡所測得的星體輻射圖，計算出地球上觀察者所見的星體速率，即視速率。結果其中有一星體的視速率竟然大於光速，由此揭示問題的所在。這個小題出得不錯，學生必須知道如何從輻射圖中，讀出星體在不同時刻時的角位置，並轉換成角位置對時間的關係圖線，再從圖線的斜率計算出星體的速率。本小題配分 2 分，考較學生從實驗數據中擷取知識的能力。本題解法相當直接，不須什麼技巧，但評分標準則甚嚴，所得數值必須相當精確，才能得分。我國學生除一位獲滿分外，其餘四位得分都未符期望，主要敗在讀取數據和作圖時不夠準確，以致所得結果和參考答案相差過大，這也是我國學生的通病。
- (2) 是本大題的核心部分，引導學生解決(1)題中所測得星體速率超過光速的困惑。試題

中的文字敘述提供了解題的線頭，附圖則暗示了思考的方向。由於遠處的星體是偏向著地球而來，因此地球觀察者所測得星體從某位置移至另一位置的時間，即所謂的視時間間隔，較真正的時間間隔為短，結果據以計算的視速率當然大於真正的速率。學生必須推導出視速率和真正速率之間的關係式。這個式子的推導過程並不難，實際上相當典型，在物理學教科書上常可見到類似的例子，學生只要考慮到星體所發出的訊號如何射抵地球，應可順利解出。本小題配分 3 分，考驗學生對實際問題的分析能力。

- (3) 是(2)小題的延伸。學生必須懂得把(2)題中處理一個星體運動所得的關係式，推廣應用至以相同速率但反向離開的兩星體運動情況。將(1)小題中所得兩星體輻射源的視速率代入本題中所導出的一對關係式，即可求得星體的真正速率以及星體運動方向和地球—星體連線之間的夾角。雖然其中之一星體的視速率大於光速，但其真正速率仍小於光速。本小題配分 1 分，和(2)小題有連鎖性，若前題未解好，那後題大概也會跟著失分。(2)和(3)兩題合起來，已實質上解答了星體視速率超過光速的困惑。
- (4) 求解在 (β, φ) 的那些變數範圍內，可測得星體的視速率超過光速。式中 β 為星體的真正速率和光速的比值， φ 為星體運動方向和地球—星體連線之間的夾角。從物理的觀點來看，在 (β, φ) -平面內具有意義的區域為 $0 < \beta < 1$ ，且 $0 \leq \varphi \leq \pi$ ；但如欲使星體的視速率超過光速，則 (β, φ) 的範圍須受進一步的限制。從(2)小題所得視速率和真正速率的關係式，可解得 β 和 φ 須滿足的條件，並找出所求 (β, φ) 範圍的邊界方程式。本小題的數學味道甚濃，相當於在解不等式，不過仍須物理的思路清晰，才能作出正確的判斷。本小題配分 2 分，考驗學生的數學解析能力。
- (5) 就給定的 β 值，求出星體視速率的極大值。這個小題比起前幾題簡單多了，只須將(2)題所得視速率和真正速率的關係式微分即可。但若(b)題沒有解出，那這一小題只好跟著丟分了！本小題配分 1 分，教育性較強，主要在告訴學生在某些情況下，星體的視速率會比光速大很多！
- (6) 這一小題的教育意味較大。利用都卜勒效應的公式，直接計算星體的真正速率，再利用(2)和(3)題的數學式，可推知星體和地球之間的距離。題目並沒有要求學生作出上述的推論，只考驗學生是否懂得應用相對論的都卜勒效應公式，以求出星體速率。本小題配分 1 分，這道試題也算是涵蓋了相對論的領域。

本題的創意性雖不高，但能設計出這麼一道既有競賽性又富於教育性的試題，應給予好評。(2)至(4)三個小題合佔 6 分，上下連鎖，易使學生陷入困境，雖是就命題原則

而言，應設法避免，但就解題過程來看，恐不得不如此。在國際委員會審查本題時，曾有熱烈的爭論，有人認為此題的數學成分過濃，建議修改或更換；但也有人盛讚此題，主張維持原樣。最後多數決議照原題通過，但修改各小題的配分，修飾文字使試題的說明更清楚，並擺放在最後一題。

我國五位學生在這一題的平均得分為 5.3 分，有三位同學得分在 7 分以上，算是相當不錯了。

二、實驗試題

由於理論試題沒有一題涉及電磁學，所以實驗題自然落入電磁學的領域。理論試題的命題工作固然困難，但實驗試題的設計，難度更高。除了尋找合適的題目外，還必須製作實驗裝置，分析數據，種種準備甚費周章，另外上百套實驗裝置所需的經費，也是在設計時必須考量的重要因素。本屆實驗題所動用的器材並不複雜，在儀器方面使用兩部掌上型多用途電表和一部函數訊號產生器；在裝置方面有一簡單的電路板（內嵌有測試線圈）、兩個 U 形鐵氧體磁芯（其中之一的兩股繞有線圈）、三張不同厚度的鋁箔、及六條接線。實驗試題分兩個部分，評析如下：

第一部分：測量渦電流的磁屏蔽效應。一般有關渦電流的實驗大多屬於示範性質，很少見有量化的實驗。本題以正弦波電流通入繞在 U 形鐵氧體磁芯上的線圈，使產生交流磁場，並使置於磁極下方的鋁箔內產生渦電流，因此減弱了穿過鋁箔的磁場。利用放在鋁箔正下方的測試線圈(pick-up coil)，測量其兩端因磁通量變化而感生的電壓，此電壓實際上反映了渦電流對輸入磁場的衰減效應。改變輸入電流的頻率，可量得衰減係數對頻率的關係曲線。這道題考驗學生的電路組合和操作能力，以及數據處理和分析的能力，能有效評定學生們電學實驗能力的高低，是一道很好的實驗試題，也有助於對渦電流性質的理解。本道題配分 8 分，我國學生的平均得分為 5.5 分，低了些，但有兩位學生得到 7 分，差堪告慰。我國學生在賽前集訓時，雖受有密集的實驗訓練，但臨場卻未能發揮出來，主要原因是學生的實驗經驗實在是太欠缺了，賽前的密集訓練未能有效轉化為自身的能力，另外學生們的一些不良實驗習慣，也許長久以來未被糾正，很難在短短的集訓期間內扭轉過來，例如讀取數據時不力求其精確、忽視誤差、漏寫單位、作圖不準、在圖上標記數據點時未附誤差槓、…等。我國學生其實都知道實驗該怎麼做，但就是做得不夠精確，而且因以上的疏忽被扣了不少分數。從國際競賽的成績來看，我國學生的實驗能力和先進國家相比，確實存在著一段差距。如何落實實驗教學，我想不必再談有什麼檢討改進的問題，而應是採取有效的方式，儘快「起而行」了！

第二部分：為有關磁通量連結的實驗。這一部分的測量項目甚多，包括有單線圈的電感測量、雙線圈的互感係數和磁通量的相加和相減效應、測量鐵氧體磁芯的磁導率等，也測驗學生對相關理論的了解。這一部分的實驗設計，我也應給予好評。每一個項目的實驗測量都不難做，但是要做得好卻不是簡單的事。本道題配分 12 分，我國學生的平均得分為 7.7 分，個人之間的得分差距不大。主要失分在鐵氧體磁導率的理論計算和實驗測量，我國學生在結合理論和實驗的能力上，還待加強。

綜觀本屆競賽試題，以理論第二題之創意最佳，其餘各題均屬佳構，命題技巧和評分標準都有頗多可觀之處，和前幾屆試題相比，要出色得多。冰島全國人口僅約二十六萬人，只設有兩所大學，全國物理教授的人數屈指可數，但是冰島的物理學界不但盡心盡力辦好歷屆規模最大的國際物理奧林匹亞競賽，而且展現如此高明的命題能力，實在令人敬佩。

我國五位學生在本屆競賽的排名和各題得分列於表一。另外主辦單位為顧及未獲獎學生的心理感受，不公開他們的成績，因此無從統計所有參賽學生的成績分布和平均得分。主辦單位僅公佈得獎學生的個人成績資料，其各項統計列於表二，表上的平均得分或中數，可視為本屆競賽成績的「高標」。兩表相對照，可看出我國學生的團隊成績，在國際優秀學生的尺度上，約居中上的位置；個人表現方面，有一位學生表現傑出，進入前百分之五的排名之內。

1998 年第 29 屆國際物理奧林匹亞競賽
我國參賽學生成績和個人排名統計表

姓名	理論第一題 (10.0)	理論第二題 (10.0)	理論第三題 (10.0)	理論成績 (30.0)	實驗 Part 1 (8.0)	實驗 Part 2 (12.0)	實驗成績 (20.0)	總分 (50.0)	獎別	名次	百分比
A	9.0	9.9	7.1	26.0	7.0	8.7	15.7	41.7	銀	12	5%
B	9.1	2.2	7.8	19.1	4.0	7.9	11.9	31.0	銅	61	23%
C	10.0	1.5	7.9	19.4	3.5	7.5	11.0	30.4	銅	67	25%
D	4.5	6.0	1.2	11.7	7.0	7.2	14.2	25.9	榮譽獎	99	37%
E	1.0	6.4	2.7	10.1	6.0	7.0	13.0	23.1	榮譽獎	139	45%
平均	6.7	5.2	5.3	17.3	5.5	7.7	13.2	30.4			

1998 年第 29 屆國際物理奧林匹亞競賽
獲獎學生競賽成績統計資料表

參賽國數：56 國 參賽人數：266 人 獲獎人數：124 人

項目	理論第一題	理論第二題	理論第三題	理論總分	實驗 Part 1	實驗 Part 2	實驗總分	總分
滿分	10.0	10.0	10.0	30.0	8.0	12.0	20.0	50.0
平均分數	6.3	6.3	5.5	18.1	6.1	7.4	13.4	31.5
中數	6.4	6.4	6.0	17.4	6.0	7.7	13.2	31.0
最高分	10.0	10.0	9.7	29.2	8.0	11.5	18.6	47.5
最低分	0.0	0.5	0.0	10.0	1.5	2.0	6.0	23.0
標準誤差	2.7	2.5	3.1	4.6	1.4	2.2	2.8	6.1

※主辦單位僅公佈獲獎學生成績資料。