

2023 年【科學探究競賽-這樣教我就懂】

普高組 成果報告表單

題目名稱：擊破心魔、飛馳極速—揭開雲霄飛車加速度的神秘狂野！

一、摘要

我們這次的科學探究競賽主要是想探討乘坐雲霄飛車時遭受到的 G 力。我們使用自製的軌道和使用 tracker 這個程式去測量不同重量的塑膠輪胎的加速度值，也探討大型的雲霄飛車在理論上會承受多少 G 值。透過此次實驗，我們了解雲霄飛車在轉動時背後的物理秘密。

當我們坐上雲霄飛車時，我們經歷了加速度、慣性和重力這些基本物理原理。加速度會將我們從靜止狀態加速到高速運動，而慣性則讓我們繼續以相同的速度和方向運動。當雲霄飛車進行急轉彎時，過彎所需的向心力會讓人們有被甩出去的感覺。最後，當雲霄飛車達到頂點時，我們會感受到重力的拉力，而下降時則會被重力向下壓縮。這些力量的結合讓我們感受到極端的速度和運動，使雲霄飛車成為受歡迎的遊樂設施之一。

二、探究題目與動機

雲霄飛車作為一項常見的遊樂設施，他本身不攜帶動力，需要靠外部裝置拉到最高處後，完全依靠位能轉換成動能。當我在遊樂園乘坐雲霄飛車時，在最低谷會有一個壓迫感直襲我的腦門。我就很疑惑雲霄飛車在轉一圈時會造成多大的 G 值以及會產生多大的瞬時加速度，並且利用我們高中學的物理使我們了解整個雲霄飛車過程中的物理意義。

我希望透過這次的科學探究來讓我們了解這個物理知識背後的原因，因為物理課本上寫的內容都是一些固定的題型，我們很少有機會能透過自己學的知識去研究世界上發生的事以獲取我們想要的訊息。這次很高興有這個機會能好好發現自然，觀察生活中的不管大大小小的事。

三、探究目的與假設

目的

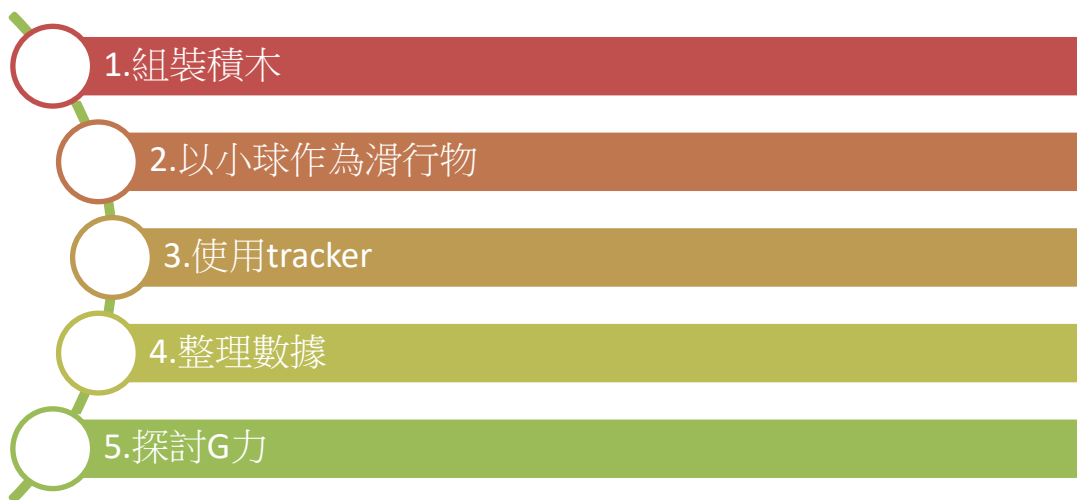
- (一)研究乘坐雲霄飛車時的 G 值
- (二)測量乘坐雲霄飛車的瞬時加速度
- (三)探討加速度和質量之間的關聯

假設

- (一)雲霄飛車的軌道成圓形
- (二)按比例縮小現實中的雲霄飛車
- (三)軌道與球之間無摩擦力
- (四)忽略一切阻力

四、探究方法與驗證步驟

實驗步驟

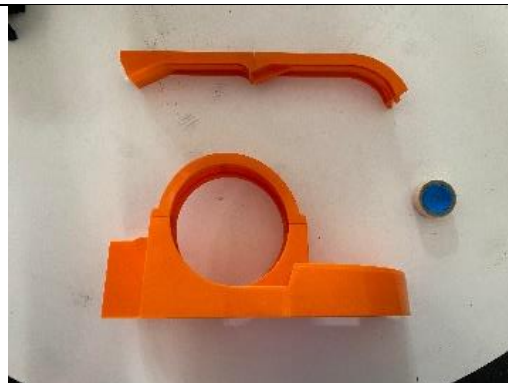


(一)製作實驗用的積木並組裝

為了探討雲霄飛車，我們動手組裝積木。我們用 3D 列印打造出具有環形軌道的模型。

遇到問題:軌道表面凹凸不平，存在額外摩擦力

解決方法:用砂紙磨平解決表面凸起物。



(二)以小球作為滑行者

當時我們這組想以汽車小玩具做實驗，發現摩擦力太大了，我們又拿彈珠，後來發現它們太重了以至於不能順利滑一整圈，而是在轉到一半時落下和不能調整重量。於是乎，我們以小輪胎填充黏土的方式，這既降低了摩擦力也降低了物重，也可調整物重，可謂一舉多得。我們只要把小輪胎放入軌道的最高處，它就會因為重力滾到最下面，又會因慣性盪至最高點再因重力滾至圓形軌道下面，即可完成一圈完整軌跡。

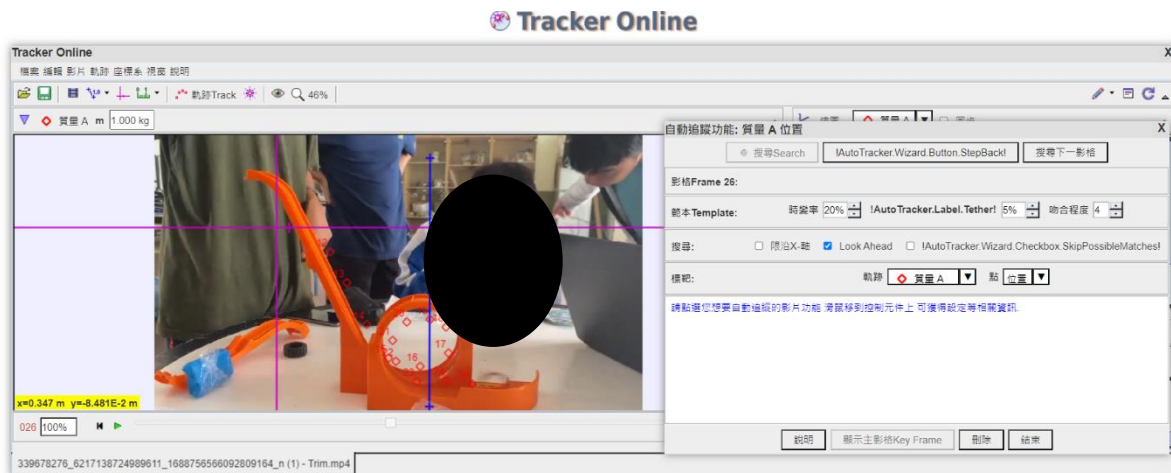
然而，看似沒問題的背後，有個隱藏問題，因為黏土具有水分，又暴露在空氣中，當在室溫的環境下放置太久，水分會蒸發，導致實驗失準，所以我們這組在每次滑行者時，都會再用磅秤再量一次，以確保準確性。

遇到問題: 滑行者太重或摩擦力太大、黏土易散失水分

解決方法: 換成小球以填充黏土的方式進行、適時增加黏土

(三)使用 tracker

為了瞭解加速度的大小，我們使用 tracker 這個軟體去追蹤並一一標記小球的路徑，以得知他的運動狀態。



What is Tracker Online?

Tracker Online is a free video analysis and modeling tool from Open Source Physics (OSP) designed for use in physics education and hosted by the AAPT, ComPADRE Digital Library. Tracker has traditionally run only on the

遇到問題: 有自動追蹤的功能，但是我們拍的影片不夠清晰，導致無法自動追蹤
 解決方法: 使用手動方式逐格追蹤運動軌跡

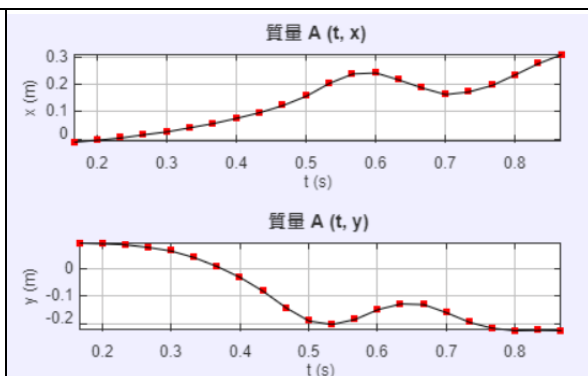
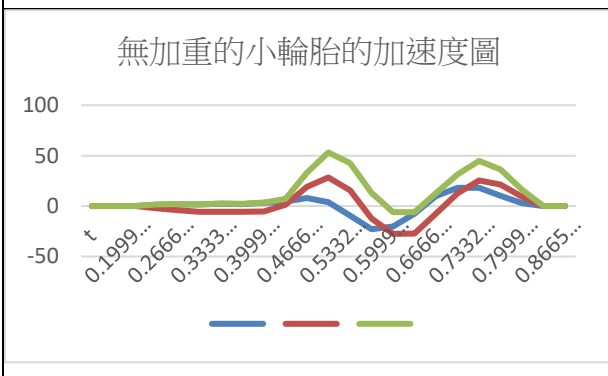
(四)數據整理

實驗變因分析

1. 操作變因: 小球質量，分別是 5/10/15 克
2. 控制變因: 軌道的彎曲程度、大小
3. 應變變因: 得到加速度關係圖

以下的加速度皆以 a_x 表示 X 分量的加速度、 a_y 表示 y 分量的加速度

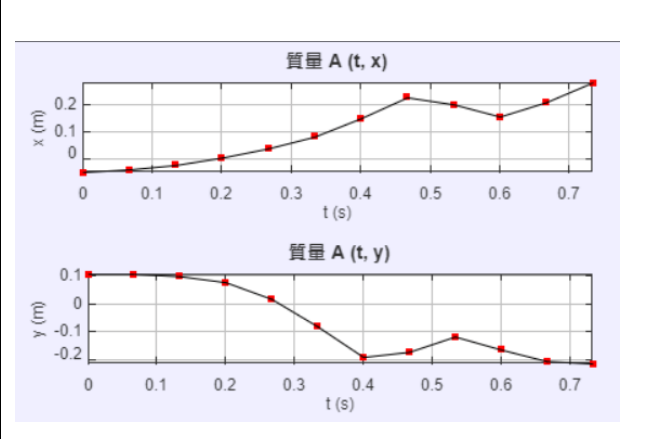
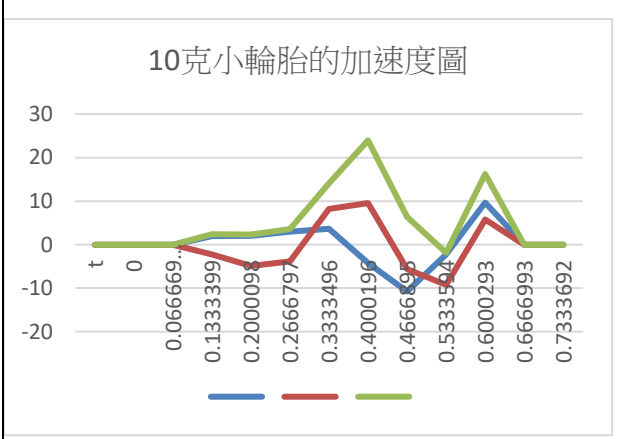
此為 5 克的小輪胎繞行軌道的軌跡圖，以向上為正，我們可以看到當小球往下走時， a_x 為正的、 a_y 為負的，當小球往上跑時， a_x 為負的、 a_y 為正的，當小輪胎繞完半圈準備向下跑時， a_x 由負轉正， a_y 由負轉正，之後的激升是因為我們把後續彈起來的軌跡也一併放入圖表中。



小輪胎加速度 XY 分量圖 藍線為 X 分量 紅線為 Y 分量 綠線為總加速度

小輪胎 XY 分量圖

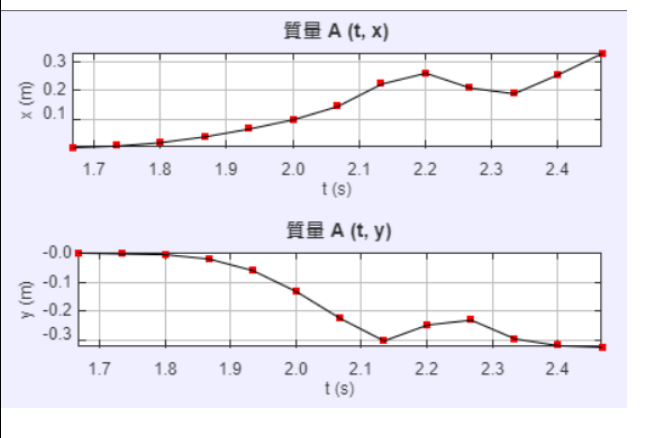
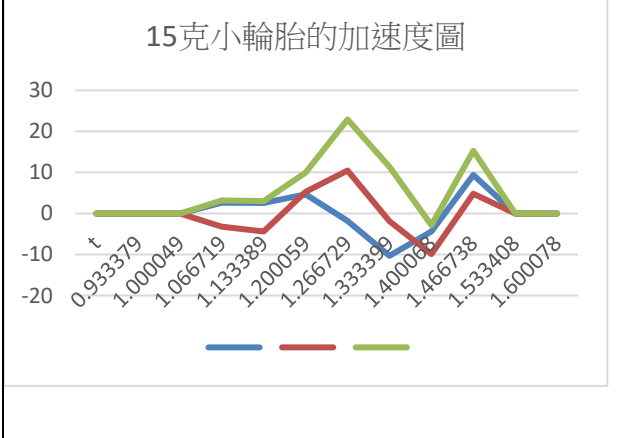
此為 10 克的小輪胎繞行軌道的軌跡圖，以向上為正，我們可以看到當小輪胎往下走時， a_x 為正的、 a_y 為負的，當小球往上跑時， a_x 為負的、 a_y 為正的，當小輪胎繞完半圈準備向下跑時，它的 a_x 由負轉正， a_y 由負轉正，與 5 克的小輪胎無異。



小輪胎加速度 XY 分量圖 藍線為 X 分量 紅線為 Y 分量 綠線為總加速度

小輪胎 XY 分量圖

此為 15 克的小輪胎繞行軌道的軌跡圖，以向上為正，我們可以看到當小球往下走時， a_x 為正的、 a_y 為負的，當小輪胎往上跑時 a_x 為負的、 a_y 為正的，當小輪胎繞完半圈準備向下跑時， a_x 由負轉正， a_y 由負轉正，與前兩者的小輪胎無異。



小輪胎加速度 XY 分量圖 藍線為 X 分量 紅線為 Y 分量 綠線為總加速度

小輪胎 XY 分量圖

從此次實驗可以看出質量對瞬時加速度的影響不大，雖然不能確定是不是球體的質量太小，導致差異不大，但是我在這之中學到了很多東西，如操作 3D 列印機、使用 tracker 軟體追蹤並分析小球的軌跡。

未來可往軌道的曲率方面延伸，使整個研究能更完整、充分。

(五)G 力

G 力是物理學中一個重要的概念，指的是一個物體在運動或轉彎時所承受的加速度。在牽引力或慣性力的作用下，物體會產生一個與運動方向垂直的加速度，這個加速度就是 G 力。

以坐在雲霄飛車上的例子來說，當雲霄飛車猛然轉彎或者下降時，我們感覺到自己被壓在座位上，這就是因為身體受到了 G 力的影響。在這個過程中，雲霄飛車加速度的大小與方向決定了產生的 G 力大小和方向。

在航空和宇宙領域，G 力也是一個很重要的概念。例如，在戰鬥機飛行中，飛行員會經歷高 G 力環境，這需要他們通過特殊的訓練和裝備來應對，否則可能會對身體造成傷害。

當車從頂峰 O 點滑行至 A 點，車減少的動能與增加的位能相等，此時完全由重力提供向心加速度，透過以下公式可知，高度差至少要有圓環半徑的一半。

設球起始高度 H，圓軌道半徑 R，若 $H > 2R$ ：當球抵達圓軌道頂端時，速率為 v 則

$$mgh = mg2R + \frac{mv^2}{2} \text{ 則 } v^2 = 2gh - 4gR$$

$$\text{所需向心加速度 } a = \frac{v^2}{R}$$

重力 g 需小於 a 才能繞完整圈 $a \geq g$

$$g \leq \frac{v^2}{R} = 2g \frac{v^2}{r} - 4g$$

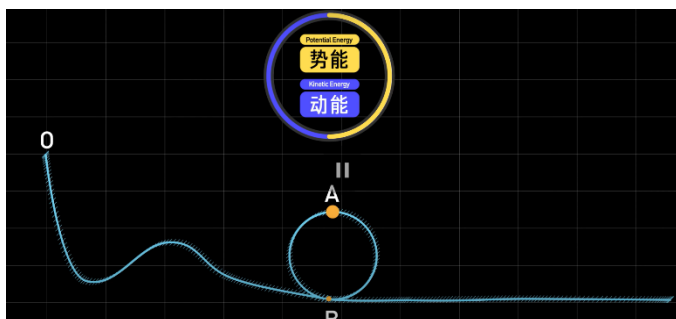
$$\therefore h \geq 2.5R$$

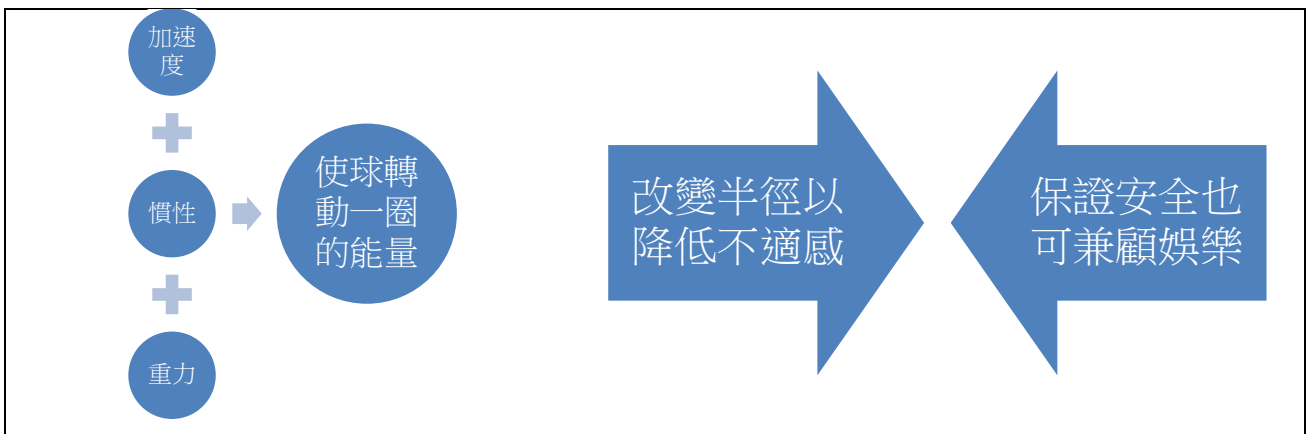
若起始高度 H 小於 2.5 R，則球將脫離原軌道而落下。

當車位於底部時，高度差至少為 2.5R，加速度至少有 5G，加上人本來受到的 1G，已經超過人類普遍承受上限。

$$a_B = \frac{v_B^2}{r} = \frac{2G \times 2.5R}{R} = 5g$$

如今，現在的雲霄飛車軌道都被設計為水滴型，車廂通過頂部較小的半徑 r_1 獲取足夠的加速度，側面和底部半徑較大從而降低加速度。





五、結論與生活應用

當代生活的雲霄飛車離不開背後的物理邏輯，我們以實驗作為基礎，理論作為後盾。雖然沒有做出完整差異，在心態崩潰的同時感到沮喪，甚至有出現改變主題念頭，但在時間的壓力下，我們仍繼續把它做完。雖然沒有得到具體結論，但我們也探討乘坐雲霄飛車時的 G 力的物理概念。

這些物理概念不只用於雲霄飛車上，從物理學到天體的運行皆是用到類似的物理邏輯。以下是延伸到的物理領域。

- 1.車輛工程：**在汽車、火車、飛機等交通運輸工具的設計和製造過程中，加速度是一個關鍵的物理概念。設計者需要了解加速度如何影響車輛的性能，以便進行優化和改進。
- 2.動力學：**加速度也是動力學研究中的重要概念。動力學研究物體的運動和力學原理，而加速度是描述運動中變化速率的量。因此，加速度在動力學研究中是非常重要的。
- 3.醫學：**在醫學領域，加速度是測量人體運動和運動損傷的一個重要指標。例如，加速度儀器可以測量運動員在運動過程中的加速度，以便評估他們的運動表現和運動損傷風險。
- 4.物理學研究：**加速度是物理學研究中的重要概念，例如在相對論中，加速度是理解物體的運動如何受到引力和空間曲率的影響的關鍵概念。
- 5.運動員訓練：**在某些運動項目中，如高飛、翻滾等，運動員需要經過特殊的訓練以應對高 G 力環境。這些訓練通常包括對身體的強化和對 G 力的耐受訓練。

參考資料

Vol.106 過山車如何讓你尖叫？

<https://youtu.be/Fkdh9zLRBRA>

有趣的雲霄飛車在力學教學上的示範

<http://utaipeir.lib.utapei.edu.tw/dspace/bitstream/987654321/1328/1/41-3>

107 指考物理詳解 17-雲霄飛車是一種常見於主題樂園中的遊樂設施

https://www.youtube.com/watch?v=iMq_Of8w_8Q

如何利用 Tracker 追蹤運動軌跡

<https://www.youtube.com/watch?v=WJUbnQbMu1o>