

大學物理學

第二冊

大學物理學

第二冊

熱學與聲學

COLLEGE PHYSICS

PART II

HEAT AND SOUND

BY

F. W. SEARS AND M. W. ZEMANSKY

譯述者

國立山東大學物理系

大學物理學編譯委員會

中華書局出版

一九五一年四月初版

大學用書

大學物理學（第二冊）

◎定價人民幣九千六百元

譯述者 楊 肇 燦 等

原書名 College Physics, Part II, Heat and Sound
原作者 F. W. Sears and M. W. Zemansky
原出版者 Addison Wesley Press
原本版次 初版

* 印翻得不 · 權作著有 *

出版者 上海河南中路二二一號 中華書局股份有限公司
印刷者 上海澳門路四七七號 中華書局上海印刷廠
發行者 中國圖書發行公司
三聯中華商務開明·聯營聯合組織

各地分店

三聯商務印書館
中華書局
開明書店
聯營書店

總目編號(15171) 印數1—5,000

大學物理學編譯委員會

主編 楊肇燦

王承瑞 王書莊 王應素 王彬華

余壽綿 周北屏 郭貽誠 陳同新

陳成琳 馮傳海 楊有楙 劉鴻賓

赫崇本 熊正威

本書內容提要

本書爲 Sears 及 Zemansky 合著 College Physics 上冊之後半部分，內容包括熱學及聲學兩大部門。熱學部分有溫度、膨脹、熱量、熱的轉發、物質的熱性質、熱力學定律等章，聲學部分有波動的性質、振動體的性質、聲的現象等章，其他不重要之論述概行從略。故本書作爲現今各大學之精簡課程教本，最爲合宜。

大學物理學

第二冊 熱學與聲學

目 錄

第十五章	溫度 膨脹.....	273
第十六章	熱量	286
第十七章	熱的轉移	302
第十八章	熱力學第一定律	312
第十九章	物質的熱性質.....	323
第二十章	熱力學第二定律.....	346
第二十一章	波動	359
第二十二章	振動物體	370
第二十三章	聲的現象	384
習題答案		405

第十五章 溫度 膨脹

余壽綿譯

15—1 溫度 物體的溫度是它的相對冷熱的量度，當我們和物體接觸的時候，我們的溫度感覺能使我們約略地估計出它的溫度，正像肌肉的緊張能讓我們知道力的大小一樣。但是溫度感覺的範圍有限，並且也不够精密，在工程上或科學工作上沒有多大價值。要量度溫度，我們一定要利用某種隨溫度而變、而且可以量度的物理性質，正如我們利用物體隨力而變的某種性質（例如螺旋彈簧的長度）來量度力的大小一樣。量度溫度的儀器，稱為溫度計。

15—2 溫度計 棒的長度，液體的體積，導線的電阻，以及燈絲的顏色，都是隨溫度而變的普通的物理性質。事實上，這些都已經用來製造各式的溫度計了。

圖15-1是一個玻璃管盛液溫度計。由薄玻璃球A和毛細玻璃管B合成，中有液體，例如水銀或染色酒精。管的上端封閉，在多數情形中還得抽去管中的空氣。B管面上刻有標度，或管的後方裝有標尺，用以量度管內液體頂端的位置，溫度計的溫度增高時，液體的體積膨脹，玻璃球A和毛細管B的容積也膨脹。假如兩者的膨脹相同，毛細管內液體頂端的位置不變。但是，事實上，液體的膨脹率比玻璃球的膨脹率大。於是當溫度增加時，管內的液

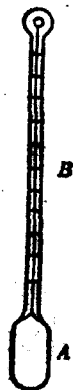


圖15-1
玻璃管盛液溫度計。

面升高；溫度減少時，液面降落。所以這種儀器是利用液體與玻璃在膨脹率上的差別。

15—3 溫度標 在工程上和日常生活上，英美等國所用的是華氏（Fahrenheit）溫度標。在科學工作上全世界通用百分溫度標。在定標度

的時候，我們選擇兩個固定的參考溫度稱為定點，而給以確定的數值。這樣就固定了零點的位置和溫度單位的大小。

一個參考溫度，冰點，是空氣飽和的水加上冰的混合劑在一個大氣壓的壓力強度下的溫度。另一個參考溫度，蒸汽點，是純水在一個大氣壓的壓力強度下沸騰時的溫度。在百分溫度標上，冰點是零，蒸汽點是100，在華氏溫度標中，冰點是32，蒸汽點是212。

利用玻管盛液溫度計，任何一個溫度 t (在百分標上)現在可以定義如下：它是這樣的一個溫度，它所產生的相對的體積變量等於從冰點到蒸汽點的體積變量的 $t/100$ 倍。假如毛細管的橫截面是均勻的，這定義就等於說溫度是和冰點以上液體柱的長度成正比例，換言之，假如先把溫度計插入冰水混合劑中，然後插入在大氣壓下沸騰的純水中，而標記下兩次液面的位置，那麼這兩個位置中間的距離可分為100個等分；這些分度線上的數目是從0到100。相當於每一分度的溫度間程，稱為一個百分度。刻度的標數可以擴充到100以上，或零以下。華氏標也是用相似的方法得到的，把冰點蒸汽點間的液體柱的長度分為180個分度，而將分度向兩端擴展。

因為同樣的溫度間程在百分標中被分為100度而在華氏標中被分為180度，所以一個百分度的溫度間程等於 $180/100$ 或 $9/5$ 倍的一個華氏標的溫度間程。

華氏標上的零點顯然是冰點下32度，兩種溫度標中零點以下的溫度都算是負的。兩種溫度標的關係最好用圖15—2來幫助記憶。

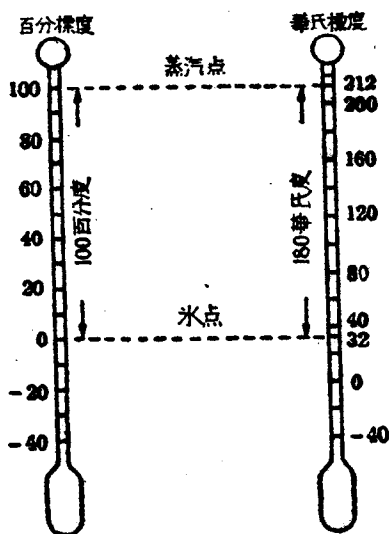


圖15—2 百分溫度標和華氏溫度標的關係。

註 設水的溫度從 20°C 升高到 30°C ，則中間經過 10 個百分度的溫度間程。這樣的一個溫度間程與百分標零度以上 10 度的一個實際溫度不同。所以我們用“百分標 10 度”或“ 10°C ”來表示實際溫度，而用“10 個百分度”或“ 10C° ”來表示溫度間程。因此，在百分標 20° 與百分標 30° 之間有 10 個百分度的間程。

從一種溫度標變換到另一溫度標，計算的方法如下：例如某物體的溫度是 30°C ，意即在這個溫度與冰點之間有 30 個百分度的間程。因 $1\text{C}^{\circ} = 9/5\text{F}^{\circ}$ （並非 $1^{\circ}\text{C} = 9^{\circ}/5\text{F}$ ）， $30\text{C}^{\circ} = 30 \times 9/5 = 54\text{F}^{\circ}$ ，所以這個溫度與冰點間有 54 個華氏度的間程。又因冰點在 32°F ，故相當於 30°C 的溫度是 $54 + 32$ 或 86°F 。下面的關係式

$$t_F = \frac{9}{5} t_C + 32, \quad t_C = \frac{5}{9} (t_F - 32),$$

可由讀者自證。其中的 t_F 和 t_C 代表同一個溫度在華氏標上和百分標上的度數。一定溫度間程在這兩種溫度標上的關係如何？

當然在兩種溫度標上，刻度沒有不能往上下兩端無限擴展的理由。但是以後我們會知道，理論與實驗都已經證明可能達到的最低溫度有一個極限，雖然最高溫度並沒有理論上的限度。這可能達到的最低溫度稱為絕對零度，它的位置是在 -273.2°C ，如果取整數就是 -273°C 。爲了某種目的，用零點在絕對零度的溫度標比較方便。這種溫度標上的溫度稱為絕對溫度，華氏與百分絕對溫度標都被採用。百分絕對溫度標也稱為愷氏（Kelvin）溫度標，這是爲了記念愷爾文，因爲他首先提倡用它。愷氏溫度標上的溫度，在數字上比百分標上的同一溫度大 273 度。於是冰點的溫度是 273°K ，蒸汽點的溫度是 373°K 。

華氏標上絕對零度是 -460°F ，所以華氏絕對溫度標上的溫度在數字上比華氏標上的同一溫度大 460° 。冰點的溫度是 492° ，蒸汽點的溫度是 672° 。

15—4 其他計溫方法 水銀在 -40°C 凝固，而且它的汽壓在溫度甚高於 360°C 時就顯得過分的高了。所以玻管盛水銀的溫度計只能在這個溫度範圍以內應用的。用酒精或戊烷等液體做的玻管盛液溫度

計，可以擴展量程，測量較低的溫度。因為它們的凝固點是在 -130°C 和 -200°C 。

金屬的電阻隨溫度的升高而增加。電阻溫度計就是利用這個事實做成的。這種溫度計的本身是繞在雲母架上的一根細導線（通常用鉑），整個裝在薄壁銀管中以資保護。然後用銅線連到量度電阻的設備，而這一套設備就可以放在任何便利地點。因為電阻的量度可以達到很高的精密度，所以電阻溫度計是量度溫度的最精密的儀器之一。精密度可以達到 0.001°C 。鉑電阻溫度計的範圍是從可能達到的最低溫度到鉑的熔點 1760°C 。

溫差電偶的電路如圖 15—3 (a) 所示。兩種不同的金屬導線相接而成一個完全電路。無論何時，若接頭 A 和 B 的溫度不同，電路中就有電動勢。對於任何一對金屬，這個電動勢隨着兩個接頭的溫度差而變。溫

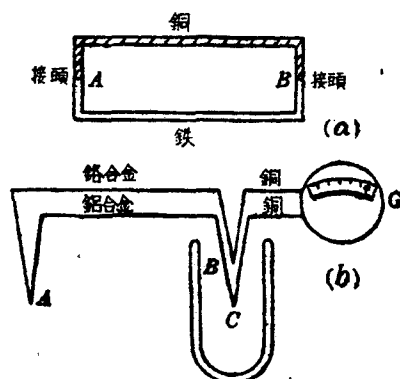


圖 15—3 溫差電偶電路。

差電偶可用作溫度計，只要把它的一個接頭與待測物體相接觸，而把另一接頭的溫度保持在某一已知的溫度（通常是 0°C ）上，然後量度所生的電動勢。常用的溫差電偶如圖 15—3 (b) 所示。接頭 B, C 放在狄瓦 (Dewar) 瓶內的冰水中，使它的溫度為 0°C 。接頭 A 是和待測物體相接觸。電動勢則從電流計 G 中看出來。圖 15—4 說明若干對通常用於溫差電偶中的金屬的電動勢隨“熱接頭”的溫度而變的情形；其“冷接頭”的

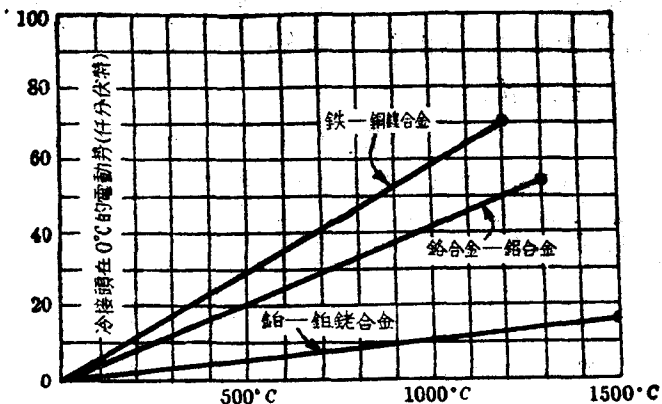


圖 15-4 若干常用的溫差電偶的電動勢。

溫度都是 0°C 。

恆體積氣體溫度計（如圖 15-5 所示），是利用氣體在一定體積下的壓力強變化。通常用氫或氧等氣體裝入玻璃器 C 中，它的壓力強可用開管水銀壓強計量度溫度。升高時氣體膨脹，使 B 管的水銀下落而 A 管的水銀上升。 A 、 B 間用橡皮管 D 連接。抬高 A 管，可使 B 管的水銀面升高到一定的參考點 E 。這樣就保持了氣體的體積不變。

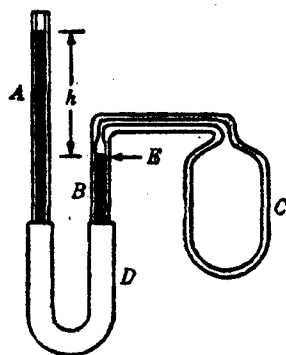


圖 15-5 恆體積氣體溫度計。

任何形式的溫度計，如玻管盛液溫度計、電阻溫度計、溫差電偶或氣體溫度計都可以用來建立一個溫度標。對於任何一個溫度計， $t^\circ\text{C}$ 可以定義如下：這個溫度所產生的特種物理性質的變量等於 0°C 與 100°C 間的變量的 $t/100$ 倍。不同種類的溫度計的溫度標不相符合。例如不同液體的玻管盛液溫度計彼此之間除 0°C 與 100°C 之外並不相符。玻管盛液溫度計與電阻溫度計等等，也不相符。不同氣體的氣體溫度計彼此之間相差最小。如果加以某些改正，它們可以符合。（但其討論不在本書

範圍之內)。並且這種改正後的溫度可證明其與愷氏溫度標相符合。氣體溫度計的溫標與其他溫標的相差不大，通常可以忽略。表 15—1 列示若干有代表性的數值。

表 15—1

恆體積氬氣溫度計和其他溫度計的比較

恆體積氬氣溫度計	水銀溫度計	鉑電阻溫度計	鉑—鉑銻合金溫差電偶
0°C	0°C	0°C	0°C
20	20.091	20.240	20.150
40	40.111	40.360	40.297
60	60.086	60.360	60.293
80	80.041	80.240	80.147
100	100	100	100

光測高溫計(圖15—6)的主要部分是一個望遠鏡，鏡管中裝有一片紅玻璃濾色器 A ，和一個小電燈泡 B 。把高溫計對準火爐，觀察者從望

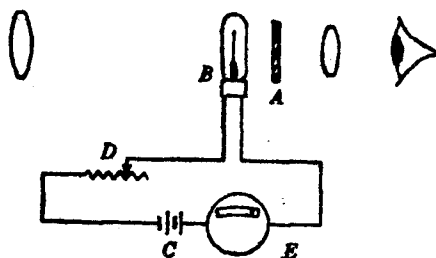


圖 15—6 光測高溫計的原理。

遠鏡中看見黑暗的燈絲和火爐的明亮的背景。燈絲和電池 C 與可變電阻 D 連接。旋轉可變電阻器的轉柄以改變燈絲中的電流，使燈絲的亮度逐漸增加，直到與背景的亮度相等。如果事先用已知的溫度校準電路中的安培計 E ，而以溫度數標記安培計上的刻度；則未知溫度可以從安培計直接看出來。因為光測高溫計的各部分都不必與熱體接觸，所以能量度在電阻溫度計或溫差電偶熔點以上的溫度。許多物質的熔點和沸點

都已經精密地測量出來，並已列成一表。這些溫度現在可以用來校準任何形式的溫度計。表 15—2 列舉若干這種溫度。

表 15—2 定點表

氫沸點	-252.78°C
氮沸點	-195.81
水銀凝固點	-38.87
冰點	0.00
蒸汽點	100.00
硫沸點	444.60
銀熔點	960.5
金熔點	1063.0

15—5 線膨脹 除了少數例外，物體的線度隨溫度的增加而增加。如果某物質的外形為棒或纜，則可看出其長度隨溫度而變（橫截面的變化很小，可以忽略）。圖 15—7 表明一根棒，在溫度為 t_0

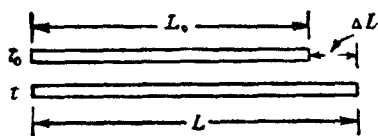


圖 15—7 線膨脹。

時，長度為 L_0 ，在較高溫度 t 時

長度為 L 。差數 $L - L_0 = \Delta L$ 即該棒因加熱而膨脹的量。從實驗中發現長度的增量 ΔL 與原有長度 L_0 成正比例，與溫度的增加 $t - t_0$ 或 Δt 亦成正比例。即

$$\Delta L \propto L_0 \Delta t \quad \text{或} \quad \Delta L = \alpha L_0 \Delta t. \quad (15-1)$$

其間的 α 是一比例恆量，稱為線膨脹係量，隨物質而異。

解方程式(15—1)，得

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot \frac{1}{\Delta t}. \quad (15-2)$$

所以物質的線膨脹係量可說是溫度每升高一度時長度的變量分數。又於上式中以 $L - L_0$ 代 ΔL 而解 L ，可得另一有用的關係式：

$$L = L_0(1 + \alpha \Delta t). \quad (15-3)$$

L 、 L_0 、和 ΔL 的單位相同，所以 α 的單位為“倒度”(百分度或華氏度)。這樣看來，銅的線膨脹係量可以寫為

$$\alpha = 14 \times 10^{-6} \text{ 每百分度}$$

或

$$\alpha = 14 \times 10^{-6} (C^\circ)^{-1}.$$

這就是說一厘米長的銅棒從 $0^\circ C$ 升高到 $1^\circ C$ 時，長度增加 0.000014 厘米。或一呎長的銅棒從 $0^\circ C$ 升高到 $1^\circ C$ 時增長 0.000014 呎。

因為一華氏度只是一百分度的 $5/9$ ，所以每華氏度的線膨脹係量，也只是每百分度線膨脹係量的 $5/9$ 。

例題 一鐵質蒸汽管在 $0^\circ C$ 時長 200 呎，問溫度升高到 $100^\circ C$ 時增長若干？
 $\alpha = 10 \times 10^{-6}$ 每百分度。

$$L_0 = 200 \text{ 呎}, \alpha = 10 \times 10^{-6} (C^\circ)^{-1}, t = 100^\circ C, t_0 = 0^\circ C.$$

$$\text{長度增量} = \Delta L = \alpha L_0 \Delta t = (10 \times 10^{-6})(200)(100) = 0.2 \text{ 呎}.$$

棒形物質的線膨脹係量可用下法測量：在棒的近兩端處劃兩條細線，測量棒的初溫度，及兩線間的原有長度。加熱使棒的溫度升高到某一溫度，然後用測長顯微鏡量度兩線的位移。

雙金屬元件是近年來已經廣泛應用的一種設置。它可以當作溫度計，或恆溫控制器的一部分。它是由兩條不同的金屬薄片鑲合而成的，如圖 15-8(a)。若金屬 A 的線膨脹係量比 B 大，則原來平直的複合條加熱後即彎成曲線，如圖 15-8(b)。複合條頂端的橫向移動比兩金屬條的長度膨脹大得多。

如用作恆溫控制器，雙金屬條的一端固定，而利用他端的移動以開關一控制電路。通常的火爐溫度計，是一繞成螺旋狀的雙金屬

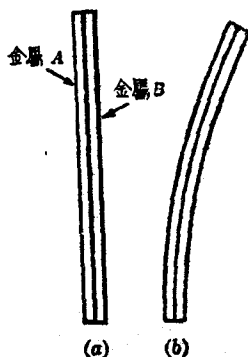


圖 15-8 雙金屬元件。

條。溫度改變時，螺旋狀的雙金屬條即有或鬆或緊的運動，這種運動被移轉到一個支架着的指針上去，使它在已經校對過的標尺上移動，由於摩擦和久用失靈的緣故，這種溫度計不是精密的儀器。

表 15—3 線膨脹係量

物 質	$\alpha(C^{\circ})^{-1}$
鋁.....	24×10^{-6}
黃銅.....	20
銅.....	14
玻璃.....	4—9
鋼.....	12
鎢.....	0.9
石英(熔化的).....	0.4
鋅.....	26

表 15—4 體積膨脹係量

物 質	$\beta(C^{\circ})^{-1}$
酒精(乙醇).....	0.745×10^{-3}
二硫化碳.....	1.140
甘油.....	0.485
水銀.....	0.182
石油.....	0.899

15—6 面膨脹和體積膨脹 金屬板或金屬片加熱後，其長度和闊度同時增加。設想一長方形金屬平板，其長度及闊度在溫度為 t_0 時各為 L_0 及 b_0 。加熱到溫度 t 時，其長度及闊度變為

$$L = L_0(1 + \alpha \Delta t),$$

及

$$b = b_0(1 + \alpha \Delta t).$$

該板的原有面積為

$$A_0 = L_0 b_0,$$

加熱後的面積爲

$$\begin{aligned} A &= Lb = L_0 b_0 (1 + \alpha \Delta t)(1 + \alpha \Delta t) \\ &= A_0 [1 + 2\alpha \Delta t + (\alpha \Delta t)^2]. \end{aligned}$$

但因 α 是很小的量，故 α^2 極小，於是 $(\alpha \Delta t)^2$ 這一項可以忽略，從而

$$A = A_0 (1 + 2\alpha \Delta t).$$

如果我們把面膨脹係量 γ 定義爲

$$A = A_0 (1 + \gamma \Delta t), \quad (15-4)$$

則

$$\gamma = 2\alpha.$$

即面膨脹係量是線膨脹係量的二倍。上述結果雖從長方形平板計算而得，但可適用於任何形狀的板。

如果板中有一個孔，孔的面積膨脹率與其周圍物質的面積膨脹率相同。縱然孔很大，以致該“板”只成孔的邊緣時，這結果仍舊真確。所以鋼質車輪外帶所包圍的“孔”的面積膨脹率，和用輪帶質料所作成與該孔面積相等的圓盤相同。

考察一長方形的固體物質，在溫度 t_0 時的長、闊、高各爲 L_0 、 b_0 、 c_0 。用與上述同樣的推理，可以證明

$$V = V_0 (1 + 3\alpha \Delta t) = V_0 (1 + \beta \Delta t). \quad (15-5)$$

其間的 V 是溫度 t 時的體積， V_0 是溫度 t_0 時的體積； $\beta (= 3\alpha)$ 是體積膨脹係量或稱立方膨脹係量。上式對於任何形狀的物體都可適用。

被固體所包圍的容積，如水槽、玻璃瓶、溫度計玻璃泡等的容積，其膨脹率 and 一個與該容積同樣大小而以四壁的質料爲質料的物體相同。

式 (15-5) 亦可用來計算液體的膨脹。液體的面膨脹和線膨脹係量，絕少意義。

例題：0°C 時水銀溫度計泡的容積爲 V_0 ，毛細管的截面爲 A_0 ，玻璃的線膨脹係量是 $\alpha_g (C^\circ)^{-1}$ ，而水銀的體積膨脹係量是 $\beta_M (C^\circ)^{-1}$ 。若 0°C 時水銀恰裝滿玻璃泡，問 $t^\circ C$ 時水銀柱的長度如何？

溫度 t 時, 玻璃泡的容積爲

$$V = V_0(1 + \beta_g t),$$

式中的 $\beta_g = 3\alpha_g$, 是玻璃的體積膨脹係量。

溫度 t 時水銀的體積爲

$$V_M = V_0(1 + \beta_M t).$$

溢出玻璃泡的水銀體積, 應爲這兩者的差, 即

$$V_0(1 + \beta_M t) - V_0(1 + \beta_g t) = V_0 t(\beta_M - \beta_g).$$

這個體積應等於水銀柱長度 l 和毛細管橫截面 A 的乘積, 而

$$A = A_0(1 + 2\alpha_g t).$$

從表 15-3 查出玻璃的線膨脹係量約爲 $5 \times 10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1}$, 即使 t 增高到 300°C , $2\alpha_g t$ 也只是 0.003. 所以與 1 相較, 可以忽略. 亦即毛細管的橫截面可以做恆量. 因此

$$lA_0 = V_0 t(\beta_M - \beta_g),$$

而

$$l = \frac{V_0}{A_0}(\beta_M - \beta_g)t.$$

所以水銀溫度計中水銀柱的長度和溫度成正比例, 也和構成這溫度計的水銀與玻璃的體積膨脹係量的差成正比例。

水, 在溫度從 0°C 到 4°C 的範圍內, 與大多數物質相反, 溫度增加, 體積反而變小. 這就是說, 在 0°C 和 4°C 之間水的膨脹係量是負的. 在 4°C 以上, 水因加熱而膨脹. 故一定量的水, 它的容積在 4°C 時爲最小, 而密度爲最大. 由於這種性質, 湖水或池水從表面開始結冰. 表 15-5 說明水的反常膨脹情形。

表 15-5 水的密度和體積

$t^\circ\text{C}$	密度—[克]/[厘米] ³	1克的體積—[厘米] ³
0	0.99987	1.00013
2	0.99997	1.00003
4	1.00000	1.00000
6	0.99997	1.00003
10	0.99973	1.00027
20	0.99823	1.00177
50	0.98807	1.01207
75	0.97489	1.02576
100	0.95838	1.04343