



物理學史研習會（九）

手冊

主辦：東吳大學物理學系

協辦：教育部普通高級中學課程物理學科中心

東吳大學第一教學研究大樓 源流講堂

2017 年 10 月 28 日



前言

東吳大學物理學系一向認為物理學史在人類文化發展中具有重大意義，因而重視物理學史的教育，曾經四度開授「物理學史」課。

2013 年 9 月 28 日及 10 月 5 日，本學系於東吳大學外雙溪校區接連舉辦「物理學史研習會」(一)及(二)；2014 年 10 月 18 日及 25 日復於東吳大學及臺中第一中學舉辦「2014 物理學史研習會」(三)及(四)；2015 年 10 月 24 日及 31 日又於東吳大學及高雄市立高雄中學舉辦「2015 物理學史研習會」(五)及(六)；2016 年 10 月 22 日及 29 日再於東吳大學及高雄中學與辦「2016 物理學史研習會」(七)及(八)。這八次研習會都因教育部「普通高級中學課程物理學科中心」參與協辦，得廣邀高中物理教師參加，裨益高中物理教育，同時增進相關學者交流，嘉惠在校學子。

今年本學系再接再厲，於 10 月 28 日在東吳大學繼續舉辦「2017 物理學史研習會(九)」，今年選定的研習會主題為「測量與國際單位制」。選這個主題，首先是因為測量乃物理學之基礎，其次是 2018 年我們即將面臨國際物理單位採用全新標準，物理教育界必須要有所因應。

我們今年請到倪維斗教授講「愛因斯坦等效原則的測量基礎」。倪教授多年從事精密測量的實驗與理論研究；他當年博士論文的指導教授 Kip. S. Thorne 今年剛因參與發現重力波得到諾貝爾物理學獎。安排倪教授講演，正是及時。

劉源俊教授今年為大家講「國際單位制的歷史及最新發展」，他要從古老的測量一直講到明年的新發展。李精益教授今年講「精密測量與諾貝爾物理獎」，他要歷述近代實驗家們的辛勤努力與精采成就；他花費許多校訂的《物理學史》才剛出版。又，新國際單位制裡最突出的改變，乃是質量改由普朗克常量來定義；鄭宜帆博士為大家講普朗克常量測定的歷史，特別有意義。

講演的書面資料與錄影，將會是後人研習的重要參考文獻。連續五年舉辦，已使「物理學史研習會」成為東吳大學物理學系的一項特色活動。未來本學系希望持續舉辦，每次訂定一個主題，使研習的內容有個焦點；希望大家繼續支持。

東吳大學物理學系主任

任慶運

謹誌

中華民國 106 年 10 月 28 日

物理學史研習會（九）

手冊

目錄

- ☐ 前言
- ☐ 物理學史研習會（九）議程
- ☐ 講師簡介
- ☐ 倪維斗 愛因斯坦等效原則的測量基礎（PPT）
- ☐ 劉源俊 國際單位制的歷史與新發展（PPT）
- ☐ 鄭宜帆 普朗克常量的測量（PPT）
- ☐ 李精益 精密測量與諾貝爾物理獎（PPT）
- ☐ 封面圖案說明



物理學史研習會（九）

時間：2017 年 10 月 28 日（星期六）

地點：東吳大學 外雙溪校區 第一教研大樓 源流講堂

主辦：東吳大學物理學系教學研發中心

協辦：教育部普通高級中學課程物理學科中心

時 間	講 者	講 題
09:30~09:35	任慶運（東吳大學物理學系主任）	開幕致詞
09:35~10:50	倪維斗（清華大學物理學系退休教授） 討論	愛因斯坦等效原則 的測量基礎
10:50~12:05	劉源俊（東吳大學物理學系名譽教授） 討論	國際單位制的歷史 與新發展
12:10 ~ 13:10 午餐		
13:10~14:25	鄭宜帆（中研院物理研究所博士後研究員） 討論	普朗克常量的測量
14:25~15:40	李精益（文藻外語大學通識教育中心副教授） 討論	精密測量與諾貝爾 物理獎
15:40 ~ 16:00 茶敘		
16:00~17:00	綜合座談 主持：劉源俊（東吳大學物理學系名譽教授）	

講師簡介

倪維斗 國立清華大學退休榮譽講座教授

國立台灣大學物理學系畢業（1966），美國加州理工學院（California Institute of Technology）物理與數學博士（1972）。

自 1974 年至 2000 年在國立清華大學任教，曾在美國 Caltech、UT at Austin、Princeton U.、U. Virginia、Center for Measurement Standard, ITRI、南京紫金山天文臺、上海師範大學、日本京都大學、上海理工大學等大學或機構擔任客座教授或研究員。

研究興趣主要在廣義相對論及其試驗、重力波的測量、宇宙論及天體物理學等。

曾經發表超過 200 篇的論文（其中超過 100 篇在 SCI 期刊）、文章或專書篇章。近年尤其豐產。今年新加坡的 World Scientific 公司才出版他編輯的新書（超過 1,300 頁）：*One Hundred Years of General Relativity: From Genesis and Empirical Foundations to Gravitational Waves, Cosmology and Quantum Gravity, Vol. I & II*。



鄭宜帆 中央研究院物理所博士後研究員

清華大學物理學士、中央大學物理博士。

研究專長為高能物理與超對稱。

除了物理學術研究之外，亦熱衷物理教育和科普傳播。於清華大學通識中心開設物理相關課程，並擔任科普媒體專欄作家，講述科學文明發展史、以及撰寫物理科普文章。

研究、教學之餘，也從事科普演講和中文科普書的編輯、審定工作。



劉源俊 東吳大學物理學系名譽教授。

國立臺灣大學理學士（1966），美國哥倫比亞大學（Columbia University）物理學博士（1972）。

在東吳大學物理學系任教已 45 年。曾任東吳大學物理學系主任、理學院院長、教務長（1983~1987）、校長（1996~2004）。又曾任臺北市立教育大學校長（2006~2008）。

在美國留學期間參與發起《科學月刊》，回臺後曾擔任總編輯、社長、理事長等重要工作二十餘年。現任臺北市科學出版事業基金會董事長。

曾獲教育部「社會教育獎章」（1982）、教育部「教學特優教師獎」（1989）、中華民國物理教育學會「物理教育傑出貢獻獎」（1990, 2008, 2012）。

興趣與專長主要在物理教育、教育理念與制度、文化發展、高等教育。



李精益 文藻外語大學通識教育中心副教授。

1960 年出生於臺灣桃園。台灣大學物理學士，清華大學物理碩士，美國 Uni. of Texas at Austin 物理博士。

自大學以來一直保持對科學/技術史、科學哲學及科學與人文社會學科間交互影響等課題的興趣。

近二十年來積極參與科學普及化的工作，撰寫文章及翻譯書籍；並曾審校數十本書，涵蓋題材廣泛，其中包括吳國盛著《科學的歷程》（科技圖書股份有限公司，2010 年 5 月）和郭奕玲、沈慧君著《物理學史》（五南出版社，2017 年 8 月）。

對通識教育課程有一構想，希望在人類文明演進的架構中，探討科學、技術在其中扮演的角色，它們各自的重大發展，彼此間的互動乃至科技與經濟、社會、政治諸層面的關聯等課題。



愛因斯坦等效原則的測量基礎

Wei-Tou Ni

*Department of Physics
National Tsing Hua University*

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation Ni

1

EEP and Universal Metrology

- EEP states that all the local physics is the same everywhere at any time in our cosmos. Therefore if we base our metrology everywhere at anytime on local physics with a universal procedure, we have a universal metrology (see, e.g. Ni [1], Petley [2]).
- For metrology, we need unit standards. At present all basic standards except for the prototype mass standard are based on physical laws, their fundamental constants and the microscopic properties of matter. The Einstein Equivalence Principle (EEP) says, in essence, local physics is the same everywhere. Therefore, to the precision of its empirical tests, EEP warrants the universality of these standards and their implementations.

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation Ni

2

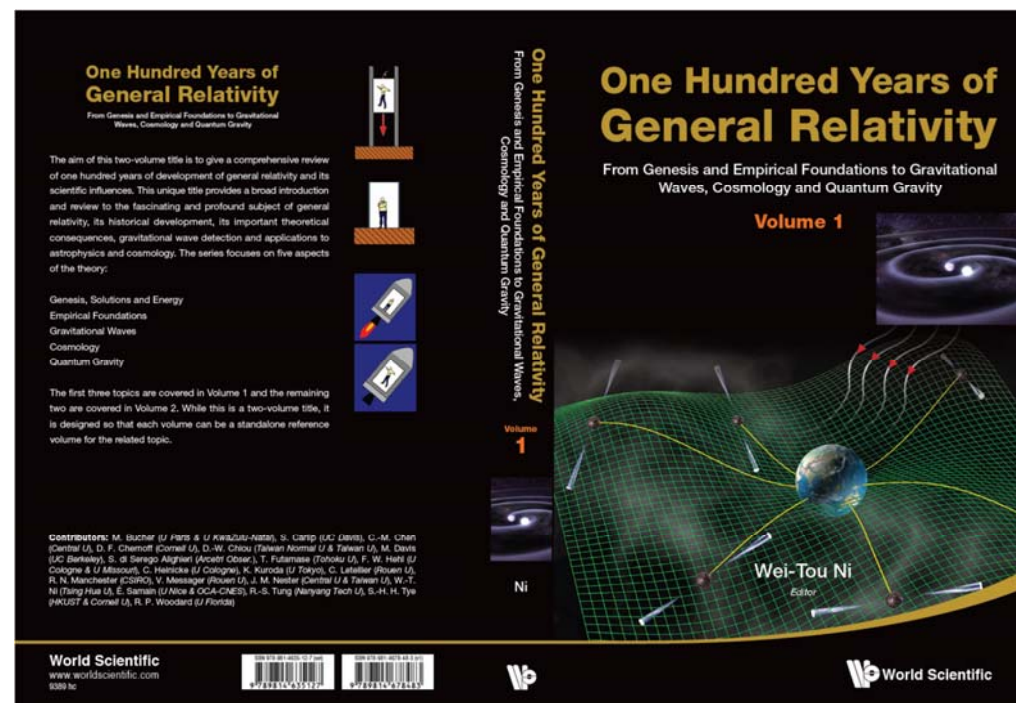
愛因斯坦等效原則

- Local physics is special relativistic physics
- What is GRAVITATION?

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation Ni

3



2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation Ni

4

SI system of units

- The name *Système International d'Unités* (International System of Units), with the abbreviation SI, was adopted by the 11th *Conférence Générale des Poids et Mesures* in 1960.
- After 1983 redefinition of meter as the length of path traveled by light in a vacuum during a time interval of $1/299792458$ of a second, all definition of SI units can be traced to the definition of second and kilogram.
- The second is defined as the duration of 9 192 631 770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the cesium-133 atom.
- The kilogram is the unit of mass; it is equal to the mass of the international prototype of the kilogram [a cylinder of platinum-iridium] (IPK).

When the mass unit is redefined by natural invariants, the SI system will be free of artefacts.

- IPK is the only physical artefact in the definition of SI 7 base units (second, meter, kilogram, ampere, kelvin, mole and candela for 7 base quantities time, length, mass, electric current, thermodynamic temperature, amount of substance and luminous intensity respectively).
- Although the uncertainty of the mass of IPK is zero by convention, there are evidence that the mass of IPK varies with a fraction of the order of 10^{-8} after storage or cleaning with the estimated relative instability $\delta m/m \approx 5 \times 10^{-8}$ over the past 100 years [3].
- In order to ensure continuity of mass metrology, it has been agreed that the relative uncertainty of any new realization must be less than 2×10^{-8} (See, e.g. Becker [4]). These experimental progresses set the stage for a new definition of kilogram using Planck constant/Avogadro number. Time is becoming mature to replace all the definitions of units using natural invariants.

Toward new definition of mass unit

- Sanchez et al. [5] in National Research Council of Canada determined the Planck's constant h using the watt balance to be $6.62607034(12) \times 10^{-34}$ J s within 2×10^{-8} relative uncertainty.
- NIST has reached 5×10^{-8} relative uncertainty and is building a new watt balance to reach 2×10^{-8} relative uncertainty [6]. The silicon sphere experiment of counting atoms to determine the Avogadro constant reached 3×10^{-8} relative uncertainty (See, e.g., Becker [4]).
- In 2014, the Avogadro constant N_A and derived Planck constant h based on the absolute silicon molar mass measurements with their standard uncertainties are $6.02214076(19) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ and $6.62607017(21) \times 10^{-34}$ J s [7]. The three measurements of NIST [7], PTB [8], and NMIJ [9] agree within their stated uncertainties and also agree with the NRC watt balance measurement with 1σ .

2018 SI new base units

- In 2018, the 5 SI base quantities -- time, length, mass, electric current, and thermodynamic temperature -- will be replaced by **frequency, velocity, action, electric charge, and heat capacity**, pending upon the expected final resolution of the 26th *Conférence Générale des Poids et Mesures* (CGPM) (See, e.g., [6]).
- The two defining constants for frequency and velocity will be the same as the present SI defining constants of time and length. The defining constants for action, electric charge, heat capacity, and amount of substance will be the Planck constant h , the elementary charge e , the Boltzmann constant k and the Avogadro constant N_A respectively.
- The mass unit can be traced to action unit defined by the Planck constant using watt balance or to amount of substance defined by the Avogadro constant based on counting the atoms in a ^{28}Si crystal. In 2018, both methods should reach an uncertainty smaller than 2×10^{-8} to guarantee consistency and continuity. The relative uncertainty of $N_A h$ at present is 7×10^{-10} (CODATA 2010 adjustment [10]) to guarantee consistency at the 2×10^{-8} level.

SI new definition and EEP

- With the new definition of units based on physical invariants of nature, the applicability becomes wider; as long as the physical laws which the units are based are valid, the standards and metrology are universal.
- In section 3 of , we have seen that the unique light cone is experimental verified to 10^{-38} via γ -ray observations at cosmological distance; it verifies the Galileo equivalence principle for photons/electromagnetic wave packets to this accuracy. This constrains the spacetime (vacuum) constitutive tensor to core metric form with additional dilaton and axion degrees of freedom.
- In the solar system the varational of the dilaton field is constrained to 10^{-10} $\mathcal{U}$; in the cosmos, the dilaton field is constrained to 8×10^{-4} (Table 1). The universal metrology system is truly universal with the present accuracies. In case the accuracies are pushed further, we either verify equivalences principles further or discover new physics. Thus we see that universal metrology and equivalence principles go hand-in hand.

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Ni

9

Table I. Constraints on the spacetime constitutive tensor χ^{ijkl} and construction of the spacetime structure (metric + axion field ϕ + dilaton field ψ) from experiments/observations in the skewonless case

Experiment	Constraints	Accuracy
Pulsar Signal Propagation	$\chi^{ijkl} \rightarrow \frac{1}{2}(-h)^{1/2}[h^{ik}h^{jl} - h^{il}h^{kj}]\psi + \phi e^{ijkl}$	10^{-16}
Radio Galaxy Observation		10^{-32}
Gamma Ray Burst (GRB)		10^{-38}
CMB Spectrum Measurement	$\psi \rightarrow 1$	8×10^{-4}
Cosmic Polarization Rotation Experiment	$\phi - \phi_0 (\equiv \alpha) \rightarrow 0$	$ \langle \alpha \rangle < 0.02,$ $\langle (\alpha - \langle \alpha \rangle)^2 \rangle^{1/2} < 0.03$
Eötös-Dicke-Braginsky Experiments	$\psi \rightarrow 1$ $h_{00} \rightarrow g_{00}$	10^{-10} 10^{-6}
Vessot-Levine Redshift Experiment	$h_{00} \rightarrow g_{00}$	1.4×10^{-4}
Hughes-Drever-type Experiments	$h_{ij} \rightarrow g_{ij}$ $h_{0i} \rightarrow g_{0i}$ $h_{00} \rightarrow g_{00}$	$10^{-18} \mathcal{U}$ $10^{-13} - 10^{-14}$ 10^{-10}

2017.

The role of equivalence principles in physics and metrology

- Equivalence principles play very important roles both in the Newtonian theory of gravity and relativistic theories of gravity. The ranges of validity of these equivalence principles or their possible violations give clues and/or constraints to the microscopic origins of gravity.
- They will be even more important when the precisions of the tests become higher. To pursue further tests of EEP, we have to look into precise experiments and observations in our laboratory, in the solar system, and in diverse astrophysical and cosmological situations. All of these depend on the progress in the field of precision measurement, and demands more precise standards.
- The constancy of constants is implied by equivalence principles. Their variations give new physics.

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Ni

11

The role of frequency measurement

- The frequency measurement has the best relative uncertainty at present. The optical clocks are reaching relative uncertainties (quasi-accuracies) at the 10^{-18} level [11]. When the comparison of optical clocks becomes common, it is anticipated that the frequency standards will go optical.
- Further improvement in the frequency measurements will have profound impact on precision measurement and gravity experiment.
- In the realm of gravitational wave (GW) detection, the influence will be to enhance the Doppler tracking method and the PTA method [12]. An array of clocks may even become an alternate method for detecting low frequency GWs.

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Ni

12

References

- 1. W.-T. Ni, Some Basic Points about Metrology, in *Proceedings of the 1983 International School and Symposium on Precision Measurement and Gravity Experiment*, Taipei, Republic of China, January 24-February 2, 1983, ed. by W.-T. Ni (Published by National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan, ROC, 1983) pp. 121-134 [<http://astrod.wikispaces.com/>].
- 2. B. W. Petley, *Fundamental Physical Constants and the Frontier of Measurement* (Bristol [Avon]; Boston: A. Hilger, 1985).
- 3. T. J. Quinn, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **40**, 81 (1991).
- 4. P. Becker, *Contemporary Physics* **53**, 461 (2012).
- 5. C. A. Sanchez, B. M. Wood, R. G. Green, J. O. Liard and D. Inglis, *Metrologia* **51**, S5-S14 (2014).
- 6. D. B. Newell, *Phys. Today*, July 2014, 35 (2014).
- 7. R. D. Vocke, S. A. Raab and G. C. Turk, *Metrologia* **51**, 361-375 (2014).
- 8. B. Andreas *et al.*, *Metrologia* **48**, S1-13 (2011).
- 9. L. Yang, Z. Mester, R. E. Sturgeon and Meija, *Anal. Chem.* **84**, 2321-7 (2012).
- 10. P. J. Mohr, B. N. Taylor, D. B. Newell, *Rev. Mod. Phys.* **84**, 1527-1605 (2012).
- 11. A. D. Ludlow, M. M. Boyd, J. Ye, E. Peik, and P. O. Schmidt, *Rev. Mod. Phys.* **87**, 637 (2015).
- 12. K. Kuroda, W.-T. Ni, and W.-P. Pan, Gravitational waves: classification, methods of detection, sensitivities, and sources, Chapter 10 in *One Hundred Years of General Relativity: From Genesis and Empirical Foundations to Gravitational Waves, Cosmology and Quantum Gravity*, ed. W.-T. Ni (World Scientific, Singapore, 2017); *Int. J. Mod. Phys. D* **24**, 1530031 (2015)

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Ni

13

等效原則的基礎

Foundation of Minkowski-Lorentz Metric and Special Relativity

- Galileo Equivalence Principle
- Weak Equivalence Principle for Light
- Einstein Equivalence Principle
- Strong Equivalence Principle

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Ni

14

Recent references

- W.-T. Ni, On spacetime structure and electrodynamics, *Int. J. Mod. Phys. D* **25** (2016) 1603001; [arXiv:1610.02745](https://arxiv.org/abs/1610.02745)
- W-T Ni, S. di Serego Alighieri, Jonathan Kaufman, and Brian Keating, Foreword, *Int. J. Mod. Phys. D* **25** (2016) 1602001.
- F. W. Hehl, Y. Itin, and Y. N. Obukhov, On Kottler's path: Origin and evolution of the premetric program in gravity and in electrodynamics, *Int. J. Mod. Phys. D* **25** (2016) 1640016; [arXiv:1607.06159](https://arxiv.org/abs/1607.06159)
- S. di Serego Alighieri, W.-T. Ni and W.-P. Pan, *Astrophys. J.* **792**, 35 (2014).
- H-H Mei, W-T Ni, S. di Serego Alighieri, W.-P. Pan and L. Xu, *Astrophys. J.* (2015); W-P Pan 2016 update
- W.-T. Ni, *RoPP* **73** (2010) 056901; Update, *IJMP: Proceedings* (2016)

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Ni

15

Outline

- Maxwell equations in Minkowski form
- Premetric formulation of electrodynamics
- Weak equivalence principles for photons in the spirit of Galileo
- Nonbirefringence of cosmic propagation
- The electrodynamics reciprocal relation
- axion, dilaton, skewon
- Polarized-Body Experiments
- Summary and outlook

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Ni

16

Relativity arose from Maxwell – Lorentz theory of electromagnetism.

- Maxwell equations in Gaussian units are:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\rho,$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = 4\pi \mathbf{J},$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0,$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0,$$

- the constitutive relation between (D, H) and (E, B) :

$$(\mathbf{D}, \mathbf{H}) = \chi(\mathbf{E}, \mathbf{B})$$

On 21 December 1907, Minkowski read before the Academy “Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern”
The fundamental equations for electromagnetic processes in Moving bodies

- Minkowski 4-dim field strength $F_{kl}(\mathbf{E}, \mathbf{B})$ and 4-dim excitation (density) $H^{ij}(\mathbf{D}, \mathbf{H})$

$$F_{kl} = \begin{pmatrix} 0 & E_1 & E_2 & E_3 \\ -E_1 & 0 & -B_3 & B_2 \\ -E_2 & B_3 & 0 & -B_1 \\ -E_3 & -B_2 & B_1 & 0 \end{pmatrix} \quad H^{ij} = \begin{pmatrix} 0 & -D_1 & -D_2 & -D_3 \\ D_1 & 0 & -H_3 & H_2 \\ D_2 & H_3 & 0 & -H_1 \\ D_3 & -H_2 & H_1 & 0 \end{pmatrix}$$

- Maxwell equations can be expressed in Minkowski form as (in this form, it is fully covariant)

$$H^{ij}{}_{,j} = -4\pi J^i,$$

■

$$e^{ijkl} F_{jk,l} = 0,$$

The constitutive relation of continuous medium:

- $H^{ij} = \chi^{ijkl}(F_{kl})$ a functional with 6 independent degrees of freedom

- For medium with a linear local response or in the linear local approximation:

$$H^{ij} = \chi^{ijkl} F_{kl}$$

with χ^{ijkl} the (linear) constitutive tensor density

- For isotropic dielectric and isotropic permeable medium: 2 dof
- for anisotropic dielectric and anisotropic permeable medium: 12 dof
- for general linear local medium (with magnetoelectric response), the constitutive tensor has 21 degrees of freedom (with $\chi^{ijkl} = \chi^{kl ij}$)

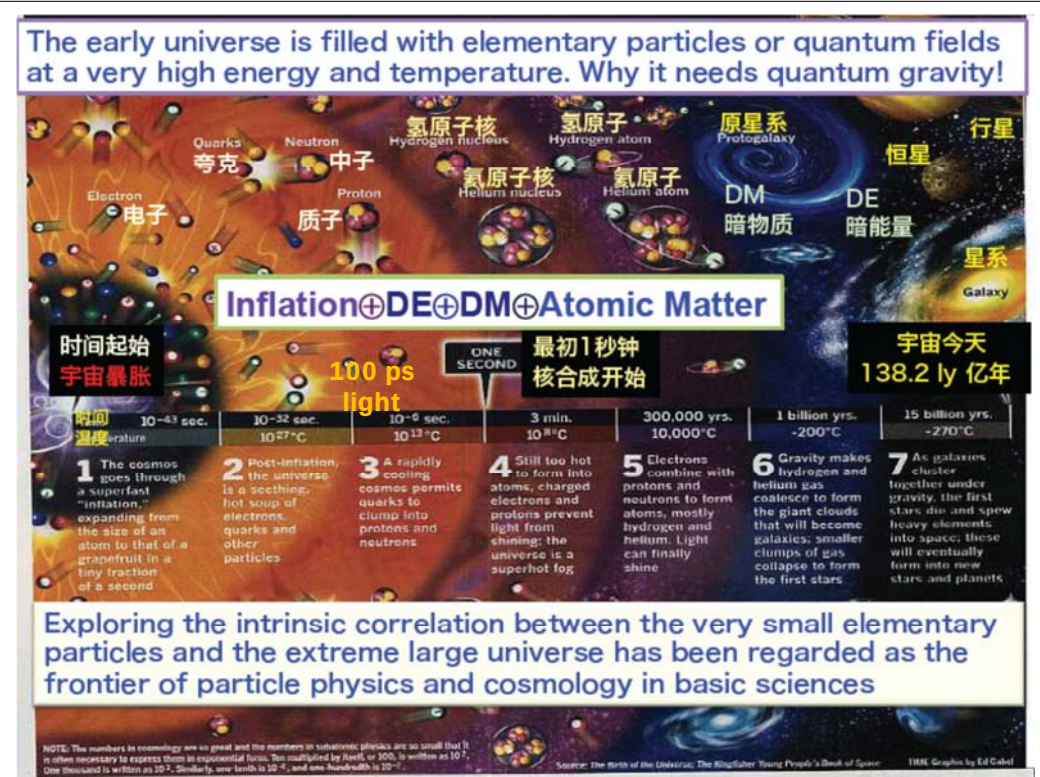
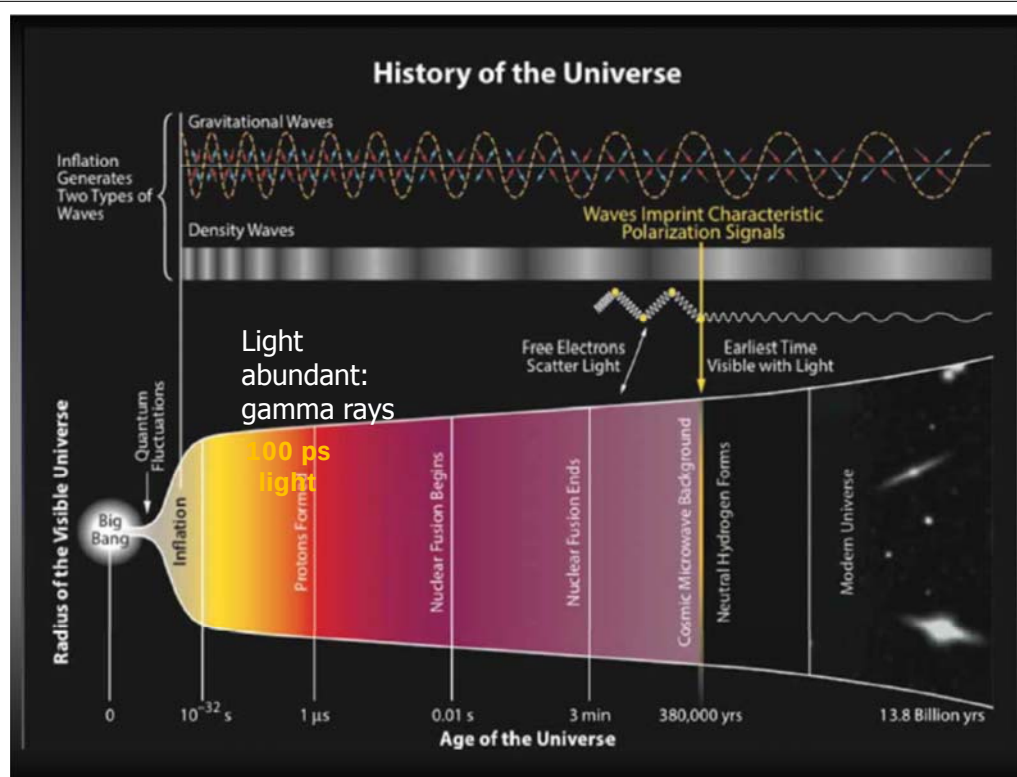
- Einstein 1916: GR, $H^{ij} = (-g)^{1/2} g^{ik} g^{jl} F_{kl}$; $\rightarrow \chi^{ijkl} = (-g)^{1/2} [(1/2) g^{ik} g^{jl} - (1/2) g^{il} g^{kj}]$

Vacuum is a medium & evolves with cosmology

- 100 ps after Big Bang (T=100 GeV)

Let there be light!

- photons came out from its ancestors -- intermediate bosons



Light, WEP I, WEP II & EEP

- Light is abundant since 1 μs (proton formation) and earlier about 100 ps after big bang
- WEP I for photon in the spirit of Galileo: the light trajectory is dependent only on the initial direction – no splitting & no retardation/no advancement, independent of polarization and frequency
- WEP II, no polarization rotation
- EEP, no amplification/no attenuation, no spectral distortion

The ISSUE

(Why Minkowski Metric? from gravity point of view)

- How to derive spacetime structure/the lightcone from classical, local and linear electrodynamics
- (i) the closure condition
- (ii) The Galileo weak equivalence principle
- (iii) The non-birefringence (vanishing double refraction) and "no amplification/dissipation" condition of astrophysical/cosmological electromagnetic wave propagation from observations

Premetric formulation of electromagnetism

- In the historical development, **special relativity** arose from the **invariance of Maxwell equations under Lorentz transformation**.
- In 1908, **Minkowski** [1] further put it into **4-dimensional geometric form with a metric invariant under Lorentz transformation**.
- The use of **metric** as dynamical gravitational potential [2] **and** the employment of **Einstein Equivalence Principle** for coupling gravity to matter [3] are two important cornerstones to **build general relativity**
- In putting Maxwell equations into a form compatible with general relativity, **Einstein** noticed that the equations can be formulated **in a form independent of the metric gravitational potential in 1916** [5,6].
- **Weyl** [7], **Murnaghan** [8], **Kottler** [9] and **Cartan** [10] & **Schrödinger** further developed and clarified this resourceful approach.

Metric-Free and Connection-Free

- Maxwell equations for macroscopic/spacetime electrodynamics in terms of independently measurable field strength F_{kl} (**E**, **B**) and excitation (density with weight +1) H^{ij} (**D**, **H**) do not need metric as primitive concept (See, e. g., Hehl and Obukhov [11]):
- $$H^{ij}{}_{,j} = -4\pi J^i, \quad e^{ijkl} F_{jk,l} = 0, \quad (1)$$
- with J^k the charge 4-current density and e^{ijkl} the completely antisymmetric tensor density of weight +1 with $e^{0123} = 1$. We use units with the light velocity c equal to 1. To complete this set of equations, a constitutive relation is needed between the excitation and the field:
- $$H^{ij} = (1/2) \chi^{ijkl} F_{kl}. \quad (2)$$

Constitutive relation : $H^{ij} = \chi^{ijkl} F_{kl}$

Since both H^{ij} and F_{kl} are antisymmetric, χ^{ijkl} must be antisymmetric in i and j , and k and l . Hence χ^{ijkl} has 36 independent components.

- Principal part: 20 degrees of freedom
- **Axion part**: 1 degree of freedom
(Ni 1973,1974,1977; Hehl et al. 2008 Cr203)
- Skewon part: 15 degrees of freedom
(Hehl-Obukhov-Rubilar skewon 2002)

$$\chi^{ijkl} = {}^{(P)}\chi^{ijkl} + {}^{(Sk)}\chi^{ijkl} + {}^{(A)}\chi^{ijkl}, \quad (\chi^{ijkl} = -\chi^{jikl} = -\chi^{ijlk})$$

$${}^{(P)}\chi^{ijkl} = (1/6)[2(\chi^{ijkl} + \chi^{klji}) - (\chi^{iklj} + \chi^{jlki}) - (\chi^{iljk} + \chi^{kjli})],$$

$${}^{(A)}\chi^{ijkl} = \chi^{[ijkl]} = \varphi e^{ijkl},$$

$${}^{(Sk)}\chi^{ijkl} = (1/2)(\chi^{ijkl} - \chi^{klji}),$$

The ISSUE

(Why Minkowski Metric? from gravity point of view)

- How to derive **spacetime structure/the lightcone** from **classical, local and linear electrodynamics**
- (i) **the closure condition**
- (ii) **The weak equivalence principles for photons**
- (iii) **The non-birefringence** (vanishing double refraction) and **"no amplification/dissipation"** condition of astrophysical/cosmological electromagnetic wave propagation **from observations**

Skewonless case: EM wave propagation

Since our galactic Newtonian potential U is of the order of 10^{-6} , we use weak field approximation in the χ -g framework. The vacuum Maxwell equation, derived from the Lagrangian (9), is

$$(\chi^{ijk\ell} A_{k,\ell})_{,j} = 0. \quad (19)$$

Neglecting $\chi^{ijk\ell}_{,p}$ in slowly varying field, (19) becomes

$$\chi^{ijk\ell} A_{k,\ell j} = 0. \quad (20)$$

For weak field, we assume

$$\chi^{ijk\ell} = \chi^{(0)ijk\ell} + \chi^{(1)ijk\ell}, \quad (21)$$

where

$$\chi^{(0)ijk\ell} = \frac{1}{2} \eta^{ik} \eta^{j\ell} - \frac{1}{2} \eta^{i\ell} \eta^{jk} \quad (22)$$

with η^{ij} the Minkowski metric and $|\chi^{(1)}|_s \ll 1$.

Dispersion relation and Nonbirefringence condition

B. Conditions for gravitational nonbirefringence — Photons propagate along a metric H_{ik}

Using eikonal approximation, we look for plane-wave solution propagating in the z -direction. Imposing radiation condition in the zeroth order and solving the dispersion relation for ω , we obtain

$$\omega_{\pm} = k \{1 + \frac{1}{4}[(K_1 + K_2) \pm \sqrt{(K_1 - K_2)^2 + 4K^2}]\} \quad (23)$$

where

$$\begin{aligned} K_1 &= \chi^{(1)1010} - 2\chi^{(1)1013} + \chi^{(1)1313}, \\ K_2 &= \chi^{(1)1020} - 2\chi^{(1)1023} + \chi^{(1)2323}, \\ K &= \chi^{(1)1020} - \chi^{(1)1023} - \chi^{(1)1320} + \chi^{(1)1323}. \end{aligned} \quad (24)$$

Photons with two different polarizations propagate with different speed $v_{\pm} = \frac{\omega_{\pm}}{k}$ and would split in 4-dimensional spacetime. The conditions for no splitting (no retardation) is $\omega_{+} = \omega_{-}$, i.e.

$$K_1 = K_2, \quad K = 0. \quad (25)$$

(25) gives two constraints on $\chi^{(1)}_s$.

The conditions for no splitting (no retardation) of electromagnetic waves propagating in every direction give the following ten constraints on $\chi^{(1)}_s$:

$$\begin{aligned} \chi^{(1)1220} &= \chi^{(1)1330}, & \chi^{(1)1010} + \chi^{(1)1313} &= \chi^{(1)2020} + \chi^{(1)2323}, \\ \chi^{(1)2330} &= \chi^{(1)2110}, & \chi^{(1)1010} + \chi^{(1)1212} &= \chi^{(1)3030} + \chi^{(1)3232}, \\ \chi^{(1)3110} &= \chi^{(1)3220}, & & \\ \chi^{(1)1020} &= -\chi^{(1)1323}, & & \\ \chi^{(1)2030} &= -\chi^{(1)2131}, & & \\ \chi^{(1)3010} &= -\chi^{(1)3212}, & & \\ \chi^{(1)1320} &= -\chi^{(1)1230}, & & \\ \chi^{(1)1320} &= -\chi^{(1)2310}, & & \end{aligned}$$

ne $H^{(1)ij}$, ψ and ϕ as

$$\begin{aligned} H^{(1)10} &\equiv H^{(1)01} = -2\chi^{(1)1220}, \\ H^{(1)20} &\equiv H^{(1)02} = -2\chi^{(1)1230}, \\ H^{(1)30} &\equiv H^{(1)03} = -2\chi^{(1)1310}, \\ H^{(1)12} &\equiv H^{(1)21} = -2\chi^{(1)1020}, \\ H^{(1)23} &\equiv H^{(1)32} = -2\chi^{(1)1030}, \\ H^{(1)31} &\equiv H^{(1)13} = -2\chi^{(1)1010}, \\ H^{(1)11} &\equiv 2\chi^{(1)2020} + 2\chi^{(1)2121} - H^{(1)00}, \\ H^{(1)22} &\equiv 2\chi^{(1)3030} + 2\chi^{(1)3232} - H^{(1)00}, \\ H^{(1)33} &\equiv 2\chi^{(1)1010} + 2\chi^{(1)1313} - H^{(1)00}, \\ \psi &\equiv 1 + 2\chi^{(1)1212} + \frac{1}{2}\eta_{00}(H^{(1)00} - H^{(1)11} - H^{(1)22} - H^{(1)33}) - H^{(1)11} - H^{(1)22}, \\ \phi &\equiv \chi^{(1)0123}. \end{aligned}$$

Note that in these definitions $H^{(1)00}$ is not defined and free. It is straightforward to show that if the ten constraints (26) are satisfied then χ can be written to first-order in $\chi^{(1)}_s$ in the form

$$\chi^{ijk\ell} = (-H)^{\frac{1}{2}} (\frac{1}{2} H^{ik} H^{j\ell} - \frac{1}{2} H^{i\ell} H^{jk}) \psi + \phi e^{ijk\ell}, \quad (28)$$

where

$$\begin{aligned} H^{ij} &= \eta^{ij} + H^{(1)ij}, \\ H &= \det(H_{ij}), \end{aligned} \quad (29)$$

$$H_{ij} H^{jk} = \delta_i^k,$$

and

$$e^{ijk\ell} = \begin{cases} 1, & \text{if } (ijk\ell) \text{ is an even permutation of } (0123), \\ -1, & \text{if } (ijk\ell) \text{ is an odd permutation of } (0123), \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (30)$$

Table I. Constraints on the spacetime constitutive tensor χ^{ijkl} and construction of the spacetime structure (metric + axion field ϕ + dilaton field ψ) from experiments/observations in the skewonless case

Experiment	Constraints	Accuracy
Pulsar Signal Propagation	$\chi^{ijkl} \rightarrow \frac{1}{2}(-h)^{1/2}[h^{ik}h^{jl} - h^{il}h^{kj}]\psi + \phi e^{ijkl}$	10^{-16}
Radio Galaxy Observation		10^{-32}
Gamma Ray Burst (GRB)		10^{-38}
CMB Spectrum Measurement	$\psi \rightarrow 1$	8×10^{-4}
Cosmic Polarization Rotation Experiment	$\phi - \phi_0 (\equiv \alpha) \rightarrow 0$	$ \langle \alpha \rangle < 0.02,$ $\langle (\alpha - \langle \alpha \rangle)^2 \rangle^{1/2} < 0.03$
Eötvös-Dicke-Braginsky Experiments	$\psi \rightarrow 1$ $h_{00} \rightarrow g_{00}$	10^{-10} 10^{-6}
Vessot-Levine Redshift Experiment	$h_{00} \rightarrow g_{00}$	1.4×10^{-4}
Hughes-Drever-type Experiments	$h_{ij} \rightarrow g_{ij}$ $h_{0i} \rightarrow g_{0i}$ $h_{00} \rightarrow g_{00}$	$10^{-18} U$ $10^{-13} - 10^{-14}$ 10^{-10}

2017.

[24]). Recent polarization observations on gamma-ray bursts gives even better constraints on nonbirefringence in cosmic propagation [27,28]. The observation on the polarized gamma-ray burst GRB 061122 ($z = 1.33$) gives a lower limit on its polarization fraction of 60% at 68% confidence level (c.l.) and 33% at 90% c.l. on the 250-800 keV energy range [27]. The observation on the polarized gamma-ray burst GRB 140206A constrains the linear polarization level of the second peak of this GRB of 28 % at 90% c.l. on the 200-400 keV energy range [28]; the redshift of the source is measured from the GRB afterglow optical spectroscopy to be $z = 2.739$. Since birefringence is proportional to the wave vector k in our case, as gamma-ray of a particular frequency (energy) travels in the cosmic spacetime, the two linear polarization eigen modes would pick up small phase differences. A linear polarization mode from distant source resolved into these two modes will become elliptical during travel and lose part of the linear coherence. The way of gamma ray losing linear coherence depends on the frequency. For a band of frequency, the extent of losing frequency depends on the distance of travel. The depolarization distance is proportional to span Δf of the frequency band $\times$ the integral $I = \int (1 + z(t)) dt$ of the redshift factor $(1 + z(t))$ with respect to the time of travel. For GRB 140206A, this is about $\Delta f I = \Delta f \int (1 + z(t)) dt \approx 2 \times 10^{20} \text{ Hz} \times 10^{18} \text{ s} \approx 2 \times 10^{38}$. (21)

The birefringence condition in Table I – historical background

netic wave propagation [29–32]. We constructed the relation (8) in the weak-violation/weak-field approximation of the Einstein Equivalence Principle (EEP) and applied to pulsar observations in 1981 [29–31]; Haugan and Kauffmann [32] reconstructed the relation (8) and applied to radio galaxy observations in 1995. After the cornerstone work of Lämmerzahl and Hehl [33], Favaro and Bergamin [34] finally proved the relation (8) without assuming weak-field approximation (see also Dahl [35]). Polarization measurements of

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Ni

34

Empirical Nonbirefringence Constraint

Since we do observe linear polarization in the 202-400 kHz frequency band of GRB 140206A with lower bound of 28 %, this gives a fractional constraint of about 10^{-38} or better on a combination of χ 's. A more detailed modeling would give better limit.

The distribution of GRBs is basically isotropic. When this procedure is applied to an ensemble of polarized GRBs from various directions, the relation (20) would be verified to 10^{-38} or better. For a more detailed discussion, please see [29].

$$\chi^{ijkl} = (-h)^{1/2}[(1/2)h^{ik}h^{jl} - (1/2)h^{il}h^{kj}]\psi + \phi e^{ijkl}$$

- to 10^{-38} , i.e., less than $10^{-34} = O(M_w/M_{\text{planck}})^2$ a significant constraint on quantum gravity

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Ni

36

Empirical foundations of the closure relation for the skewonless case

In terms of κ_{ij}^{kl} (defined in (6)) and re-indexed κ_I^J , the constitutive tensor (20) is represented in the following forms:

$$\kappa_{ij}^{kl} = (1/2) \epsilon_{ijmn} \chi^{mnkl} = (1/2) \epsilon_{ijmn} (-h)^{1/2} h^{mk} h^{nl} \psi + \varphi \delta_{ij}^{kl}, \quad (22)$$

$$\kappa_I^J = (1/2) \epsilon_{ijmn} (-h)^{1/2} h^{mk} h^{nl} \psi + \varphi \delta_I^J, \quad (23)$$

where δ_{ij}^{kl} is a generalized Kronecker delta defined as

$$\delta_{ij}^{kl} = \delta_i^k \delta_j^l - \delta_i^l \delta_j^k. \quad (24) \text{ Less than 100 operations}$$

The (generalized) closure relation is satisfied

$$\kappa_I^J \kappa_J^K = \delta_I^K [(1/2) \psi^2 + \varphi^2] + {}^{(P)}\kappa_I^K \varphi = (1/2) \delta_I^K \psi^2 + 2 \kappa_I^K \varphi.$$

From table I, this is verified to 10×10^{-38}

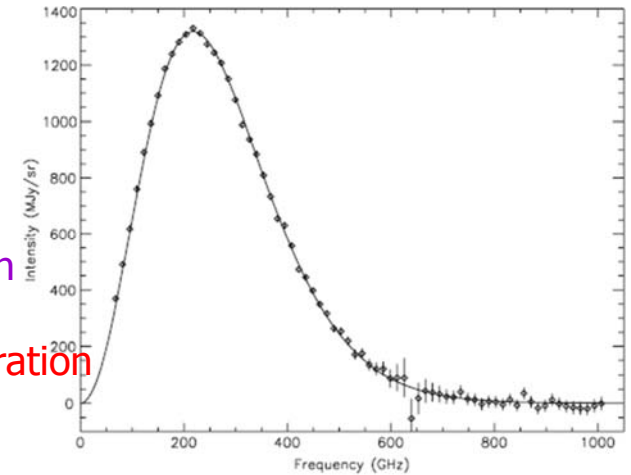
The Cosmic MW Background Spectrum: 2.7255 ± 0.0006 K

D. J. Fixsen, *Astrophys. J.* 707 (2009) 916

No amplification/
No attenuation
(No dilaton)

No distortion
(No Type I Skewon)

Redshifted (Acceleration
Equivalent)



In this section, we derive the electromagnetic wave propagation and the dispersion relation in dilaton and axion field. Let us begin with the general problem of wave propagation in electrodynamics (1a, 1b) with constitutive relation (2) for explaining and fixing the scheme. The sourceless Maxwell equation (1b) is equivalent to the local existence of a 4-potential A_i such that

$$F_{ij} = A_{j,i} - A_{i,j}, \quad (10)$$

with a gauge transformation freedom of adding an arbitrary gradient of a scalar function to A_i . The Maxwell equation (1a) in vacuum with (3) is then

$$(\chi^{ijkl} A_{k,l})_{,j} = 0. \quad (11)$$

Using the derivation rule, we have

$$\chi^{ijkl} A_{k,l,j} + \chi^{ijkl}_{,j} A_{k,l} = 0. \quad (12)$$

Results

derived that the amplitude and phase factor of propagation in the cosmic dilaton and cosmic axion field is changed by

$$(\psi(P_1)/\psi(P_2))^{1/2} \exp[ikz - ikt \pm (-i)(\varphi(P_1) - \varphi(P_2))t].$$

Constraint from CMB spectrum

$$|\Delta\psi|/\psi \leq 4(0.0006/2.7255) \approx 8 \times 10^{-4}. \quad (33)$$

Direct fitting to the CMB data with the addition of the scale factor $\psi(P_1)/\psi(P_2)$ would give a more accurate value.

CMB observations

7 orders or more improvement in amplitude,
15 orders improvement in power since 1965

- **1948 Gamow** – hot big bang theory; **Alpher & Hermann** – about **5 K CMB**
- **Dicke** -- oscillating (recycling) universe: entropy → **CMB**
- **1965 Penzias-Wilson** excess antenna temperature at 4.08 GHz **3.5 ± 1 K** 2.5 → 4.5 (CMB temperature measurement)
- Precision to $10^{-(3-4)}$ → dipolar (earth) velocity measurement
- to $10^{-(5-6)}$ **1992 COBE** anisotropy meas. → acoustic osc.
- **2002 Polarization measurement (DASI)**
- **2013 Lensing B-mode polarization (SPTpol)**
- **2014 POLARBEAR, BICEP2 and PLANCK** (lensing & dust B-mode)

2017.10.14. Soochow U

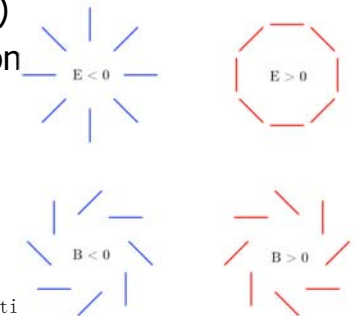
EEP and its metrological foundation

Ni

41

Three processes can produce CMB B-mode polarization observed

- (i) gravitational lensing from E-mode polarization (Zaldarriaga & Seljak 1997),
- (ii) **local quadrupole anisotropies in the CMB** within the last scattering region by large scale GWs (Polnarev 1985)
- (iii) **cosmic polarization rotation (CPR)** due to pseudoscalar-photon interaction (Ni 1973; for a review, see Ni 2010).
(The CPR has also been called **Cosmological Birefringence**)
- (iv) **Dust alignment**



2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

NEW CONSTRAINTS ON COSMIC POLARIZATION ROTATION FROM DETECTIONS OF B-MODE POLARIZATION IN CMB

Alighieri, Ni and Pan

- consistent with no CPR detection
- The constraint on CPR fluctuation is about 1.5° .

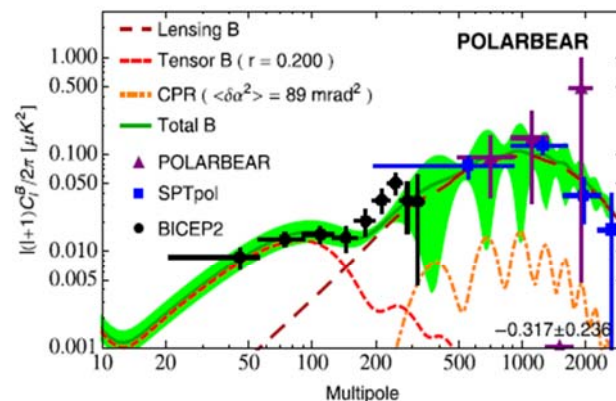


Figure 3. Same as Figure 2, but for the POLARBEAR data points (purple filled triangle). r is set to 0.2 to conform to BICEP2 data; the effect of setting r to 0.2 or to 0 for the fitting of the CPR fluctuation is small since the power contributed by a non-vanishing r to the total power is small for the multipoles measured in the POLARBEAR experiment.

2017.10.14. Soochow U

EEP

CPR Discussions (1404.1701)

Ap. J. September 1, 2014

- We have investigated, both theoretically and experimentally, the possibility to detect CPR, or set new constraints to it, using its coupling with the B-mode power spectra of the CMB.
- Three experiments have detected B-mode polarization in the CMB:
 - **SPTpol** (Hanson et al. 2013) for $500 < l < 2700$,
 - **POLARBEAR** (Ade et al. 2014a) for $500 < l < 2100$,
 - **BICEP2** (Ade et al. 2014b) for $20 < l < 340$.

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Ni

44

Table I. Constraints on the spacetime constitutive tensor χ^{ijkl} and construction of the spacetime structure (metric + axion field ϕ + dilaton field ψ) from experiments/observations in the skewonless case

Experiment	Constraints	Accuracy
Pulsar Signal Propagation	$\chi^{ijkl} \rightarrow \frac{1}{2}(-h)^{1/2}[h^{ik}h^{jl} - h^{il}h^{kj}]\psi + \phi e^{ijkl}$	10^{-16}
Radio Galaxy Observation		10^{-32}
Gamma Ray Burst (GRB)		10^{-38}
CMB Spectrum Measurement	$\psi \rightarrow 1$	8×10^{-4}
Cosmic Polarization Rotation Experiment	$\phi - \phi_0 (\equiv \alpha) \rightarrow 0$	$ \langle \alpha \rangle < 0.02,$ $\langle (\alpha - \langle \alpha \rangle)^2 \rangle^{1/2} < 0.03$
Eötvös-Dicke-Braginsky Experiments	$\psi \rightarrow 1$ $h_{00} \rightarrow g_{00}$	10^{-10} 10^{-6}
Vessot-Levine Redshift Experiment	$h_{00} \rightarrow g_{00}$	1.4×10^{-4}
Hughes-Drever-type Experiments	$h_{ij} \rightarrow g_{ij}$ $h_{0i} \rightarrow g_{0i}$ $h_{00} \rightarrow g_{00}$	$10^{-18} U$ $10^{-13} - 10^{-14}$ 10^{-10}

2017.

Table II. 1st-order and 2nd-order constraints on various constitutive tensors from various experiments/observations.

Constitutive tensor	Birefringence (in the geometric optics approximation)	Dissipation/ amplification	Spectroscopic distortion	Cosmic polarization rotation
Metric: $\frac{1}{2}(-h)^{1/2}[h^{ik}h^{jl} - h^{il}h^{kj}]$	No	No	No	No
Metric + dilaton: $\frac{1}{2}(-h)^{1/2}[h^{ik}h^{jl} - h^{il}h^{kj}]\psi$	No (to all orders in the field)	Yes (dilaton gradient)	No	No
Metric + axion: $\frac{1}{2}(-h)^{1/2}[h^{ik}h^{jl} - h^{il}h^{kj}]$ $+ \phi e^{ijkl}$	No (to all orders in the field)	No	No	Yes (axion gradient)
Metric + dilaton + axion: $\frac{1}{2}(-h)^{1/2}[h^{ik}h^{jl} - h^{il}h^{kj}]\psi$ $+ \phi e^{ijkl}$	No (to all orders in the field)	Yes (dilaton gradient)	No	Yes (axion gradient)
Metric + type I skewon	No to first order	Yes	Yes	No
Metric + type II skewon	No to first order; yes to 2 nd order	No to first order; no to 2 nd order	No	No
Metric + $^{(P)}\chi^{(c)}$ + type II skewon	No to first order; no to 2 nd order	No to first order; no to 2 nd order	No	No
Asymmetric metric induced: $\frac{1}{2}(-q)^{1/2}(q^{ik}q^{jl} - q^{il}q^{jk})$	No (to all orders in the field)	No	No	Yes (axion gradient)

Discussion

Looking for empirical evidence for going from generalized to original closure relation also

- Skewonless case is summarized in Table I
- Skewonful case is summarized in Table II
- With the empirical constraints, axion, dilaton and Type II skewon would warrant to be studied further in vacuum and in cosmos. There are eight degrees of freedom. Among this asymmetric metric would be to be explored for torsion, dark matter, dark energy. Eddington, Einstein, Straus, Schrödinger ... have considered this. It might be considered again in a different way. Especially when skewon could be source for torsion (Hehl's talk in this workshop)

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Ni

46

Summary and Outlook

- We have derived empirically the Minkowski metric to ultrahigh precision using the guide principle of weak equivalence. From cosmic electromagnetic wave propagation in various direction, it is verified to the order of 10^{-38} , that is, to $10^{-4} \times O([M_{\text{Higgs}}/M_{\text{Planck}}]^2)$. This gives constraints on theories of quantum gravity
- With the Minkowski metric there are axions and dilatons in this derivation. Before the electroweak transition ($< 1\text{ps}$), this gives some freedom in exploring early cosmology.
- Residues of these axions and dilatons may be detectable or constrained in the later epochs
- Combined with Itin, Hehl and Obukhov approach

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Ni

48

Further Investigations

PHYSICAL REVIEW D 95, 084020 (2017)

Premetric equivalent of general relativity: Teleparallelism

Yakov Itin*

*Institute of Mathematics, The Hebrew University of Jerusalem,
Jerusalem College of Technology, Jerusalem 91160, Israel*

Friedrich W. Hehl†

*Institute for Theoretical Physics, University of Cologne, 50923 Cologne, Germany
and Department of Physics and Astronomy, University of Missouri, Columbia, Missouri 65211, USA*

Yuri N. Obukhov‡

*Theoretical Physics Laboratory, Nuclear Safety Institute, Russian Academy of Sciences,
B. Tulkaya 52, 115191 Moscow, Russia*

Lagrangian
Constitutive tensor

$$\Lambda = -(1/2)F \wedge H$$

$$\chi^{\alpha\beta\gamma\delta}$$

$$\Lambda = -(1/2)F^a \wedge H_a$$

$$\chi^{\beta\gamma\mu}$$

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Ni

49

Unified field theory of basic forces and elementary particles with gravitational origin of gauge symmetry in hyper-spacetime

Yue-Liang Wu*

a International Centre for Theoretical Physics Asia-Pacific (ICTP-AP), Beijing, China

b Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences (ITP-CAS), Beijing 100190, China

c University of Chinese Academy of Sciences (UCAS), Beijing 100049, China

$$I_H \equiv \int [d\hat{x}] \chi \left\{ \frac{1}{2} \bar{\Psi} \Gamma^A \hat{\chi}_A^M (i\partial_M + g_h \mathcal{A}_M) \Psi \right. \\ \left. + \phi^{D_h-4} \left[-\frac{1}{4} (\tilde{\chi}_{ABA'B'}^{MNM'N'} \mathcal{F}_{MN}^{AB} \mathcal{F}_{M'N'}^{A'B'} + W_{MN} W^{MN}) \right. \right. \\ \left. \left. + \alpha_E \phi^2 \frac{1}{4} \tilde{\chi}_{AA'}^{MNM'N'} G_{MN}^A G_{M'N'}^{A'} + \frac{1}{2} \hat{\chi}^{MN} d_M \phi d_N \phi \right. \right. \\ \left. \left. - \beta_E \phi^4 \right] \right\} + 2\alpha_E g_h \partial_M (\chi \phi^{D_h-2} \mathcal{A}_N^{NM}),$$

$$\hat{x} \equiv x^M \text{ and } A, M = 0, 1, 2, 3, 5, \dots, D_h \ (D_h = 19)$$

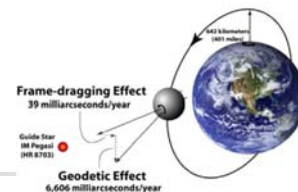
2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Ni

50

WEP II and GP-B experiment



Experiment	ν [scm ⁻²] ($= \delta m / I$)	$ \eta $ ($= \delta m / m $)	Method
Hayasaka–Takeuchi (1989)	$(-9.8 \pm 0.9) \times 10^{-9}$ for spin up, $\pm 0.5 \times 10^{-9}$ for spin down	Up to 6.8×10^{-5}	Weighing
Faller <i>et al</i> (1990)	$\pm 4.9 \times 10^{-10}$	$< 9 \times 10^{-7}$	Weighing
Quinn–Picard (1990)	$ \nu \leq 1.3 \times 10^{-10}$	$< 2 \times 10^{-7}$	Weighing
Nitschke–Wilmarth (1990)	$ \nu \leq 1.3 \times 10^{-10}$	$< 5 \times 10^{-7}$	Weighing
Imanishi <i>et al</i> (1991)	$ \nu \leq 5.8 \times 10^{-10}$	$< 2.5 \times 10^{-6}$	Weighing
Luo <i>et al</i> (2002)	$ \nu \leq 3.3 \times 10^{-10}$	$\leq 2 \times 10^{-6}$	Free fall
Zhou <i>et al</i> (2002)	$ \nu \leq 2.7 \times 10^{-11}$	$\leq 1.6 \times 10^{-7}$	Free fall
Everitt <i>et al</i> (2008)	6.6×10^{-15}	$\leq 1 \times 10^{-11}$	Free fall
Ni <i>et al</i> (1990)	$ \nu_{\text{spin}} \leq 8.6 \times 10^{-3}$	$\leq 5 \times 10^{-9}$	Weighing
	$ \nu_{\text{orbit}} \leq 4.3 \times 10^{-3}$		
	$ \nu_{\text{total}} \leq 8.6 \times 10^{-3}$		
	$ \nu_{\text{spin}} \leq 14.7 \times 10^{-3}$		
Hou–Ni (2001)	$ \nu_{\text{orbit}} \leq 8.3 \times 10^{-3}$	$\leq 7.1 \times 10^{-9}$	Torsion balance
	$ \nu_{\text{total}} \leq 14.7 \times 10^{-3}$		

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Ni

51

Gyro gravitational ratio

- Gyrogravitational factor is defined to be the response of an angular momentum in a gravitomagnetic field
- If we use macroscopic spin angular momentum in GR as standard, its gyromagnetic ratio is 1 by definition
- As studied by Obukhov, Silenko & Teryaev (talk by Teryaev), for a Dirac particle, the response of the spin of a Dirac particle is the same in gravitomagnetic field, so its gyromagnetic ratio should be 1 also. (See, also, Huang & WTN, [arXiv:gr-qc/0407115](https://arxiv.org/abs/gr-qc/0407115))
- Active frame-dragging of a polarized Dirac particle is the same of that of a macroscopic angular momentum, Andrew Randon [Phys.Rev.D81:024027,2010](https://arxiv.org/abs/Phys.Rev.D81:024027,2010)

2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Ni

52

Potential Experiments

to measure **particle gyromagnetic ratio**
-- probing the structure and origin of gravity

- using spin-polarized bodies (e.g. polarized solid He3) instead of rotating gyros in a GP-B type experiment to measure the He3 gyrogravitational ratio (Ni 1983c). (or HoFe, TbFe)
- Atom interferometry (Berman 1997, Dimopoulos et al 2008),
- Nuclear spin gyroscopy (Kornack et al 2005), comagnetometer (Allmendinger, Tullney, Changbo Fu talks)
- superfluid He3 gyrometry
- Precision needed: e.g., **comagnetometer**, **measuring earth rotation to $\sim 10^{-3}$** , **needs another 6-7 order of magnitude**

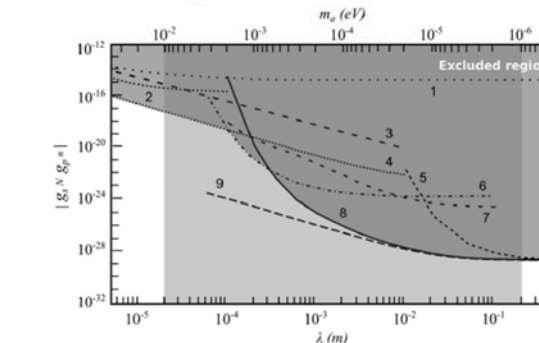
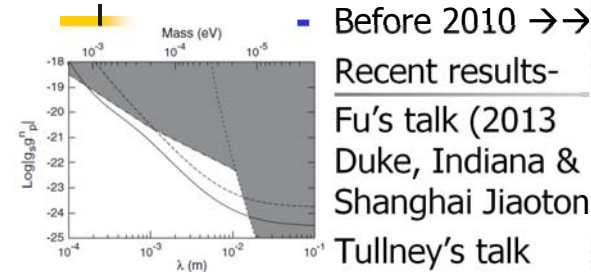
2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Ni

53

Spin-Mass coupling



2017.10.14. Soochow U

EEP and its metrological foundation

Figure 4. Limits on $\sigma \cdot r$ spin coupling for axion-like interactions from various experiments.

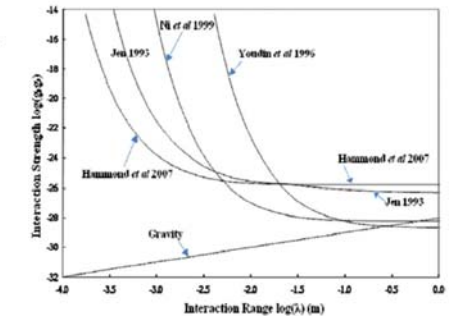
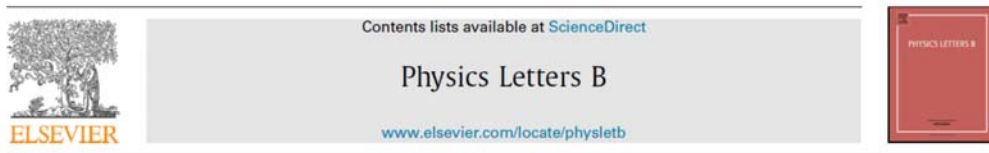


Figure 5. Current experimental limits on pseudoscalar in the short range couplings as a function of interaction range.

Physics Letters B 773 (2017) 677–680



Improved constraints on monopole–dipole interaction mediated by pseudo-scalar bosons

N. Crescini^{a,b,*}, C. Braggio^c, G. Carugno^c, P. Falferi^d, A. Ortolan^b, G. Ruoso^b

^a Dipartimento di Fisica e Astronomia, Vic. Marzolo 8, I-35131 Padova, Italy

^b INFN, Laboratori Nazionali di Legnaro, Viale dell'Università 2, I-35020 Legnaro, Padova, Italy

^c Dipartimento di Fisica e Astronomia, Vic. Marzolo 8, I-35131 Padova, Italy

^d INFN, Laboratori Nazionali di Legnaro, Viale dell'Università 2, I-35020 Legnaro, Padova, Italy

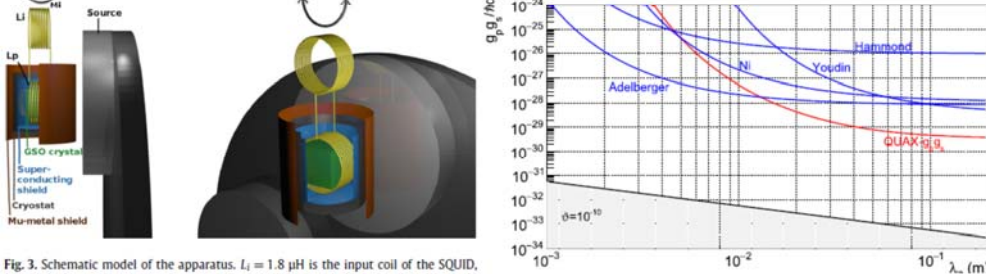


Fig. 3. Schematic model of the apparatus. $L_i = 1.8 \mu\text{H}$ is the input coil of the SQUID, $L_p \approx 1.8 \mu\text{H}$ is the pick-up coil wound on the GSO crystal. On the right side of the figure is represented a source mounted on the rotating wheel.

foundation

Ni

55

Spin-Cosmos Experiments

$$H_{\text{cosmic}} = C_1 \sigma_1 + C_2 \sigma_2 + C_3 \sigma_3$$

Allmendinger et al. (talk)

As (for polarized valence n)

a result we obtain an upper limit on the equatorial component of the background field interacting with the spin of the bound neutron $\sim b_{n\perp} < 8.4 \times 10^{-34} \text{ GeV}$ (68% C.L.). Our result improves our **previous limit** (data measured in 2009) **by a factor of 30** and the **world's best limit by a factor of 4**.

2017.10.14. Soochow U

Table 6. Cosmic-spin coupling experiments using electron spins. $\delta E_{\perp} = 2(C_1^2 + C_2^2)^{1/2}$ and $\delta E_{\parallel} = 2|C_3|$ are the energy level splitting parallel and transverse to the Earth's rotation axis, respectively.

Reference	$\delta E_{\perp}$ (10^{-18}) eV	$\delta E_{\parallel}$ (10^{-18}) eV
Phillips (1987)	≤ 8.5	N.A.
Wineland et al (1991)	≤ 550	≤ 780
Chen et al (1992)	≤ 7.3	N.A.
Wang et al (1993)	≤ 3.9	N.A.
Chang et al (1995)	≤ 3.0	N.A.
Berglund et al (1995)	≤ 1.7	N.A.
Hou et al (2003)	≤ 0.06	≤ 1.4
Heckel et al (2006)	≤ 0.0004	≤ 0.01

$$b_{\perp}^e [= (C_1^2 + C_2^2)^{1/2}] \leq 1.5 \times 10^{-31} \text{ GeV}$$

$$|b_z^e| [= |C_3|] \leq 5 \times 10^{-30} \text{ GeV}$$

For electron

EEP and its metrological foundation

Ni

56

References

for EP experiments with polarized bodies &
Spin-Spin Experiments, see following

- W.-T. Ni, Equivalence principles, spacetime structure and the cosmic connection, to be published as Chapter 5 in the book: One Hundred Years of General Relativity: from Genesis and Empirical Foundations to Gravitational Waves, Cosmology and Quantum Gravity, edited by Wei-Tou Ni (World Scientific, Singapore, 2015).
- W-T Ni, Rep. Prog. Phys. 73 (2010) 056901.
- W.-T. Ni, Spacetime structure and asymmetric metric from the premetric formulation of electromagnetism, to be submitted to arXiv.
- And References therein together with references in the 3 articles of the title page

Thank You !

國際單位制的歷史 與新發展

劉源俊 / 東吳大學
物理學史研習會（九）
東吳大學源流講堂
106年10月28日



測量

- 物理學建立在測量的基礎上，探討物理量之間的關係。
- 物理量各有其單位。
- 將某些單位作為基本單位，從基本單位可導出其它單位。
- 單位需要有標準。
- **SI** (Système international d'unités) 是**國際標準單位制（公制）**。



基本量與導來量

- 若以時間與長度為基本量，則速度是導來量。
- 若以速度與時間為基本量，則長度是導來量。
- 若以能量、速度為基本量，則質量是導來量。
- 牛頓力學以時間、長度、質量為基本量。
- 用什麼量當作基本量，取決於什麼量測得較精確。
- 測量的精密度與時俱進。
- 國際基本單位因此演進。
- 一些基本常量的精密度既然已經很高了，乾脆訂為定值。

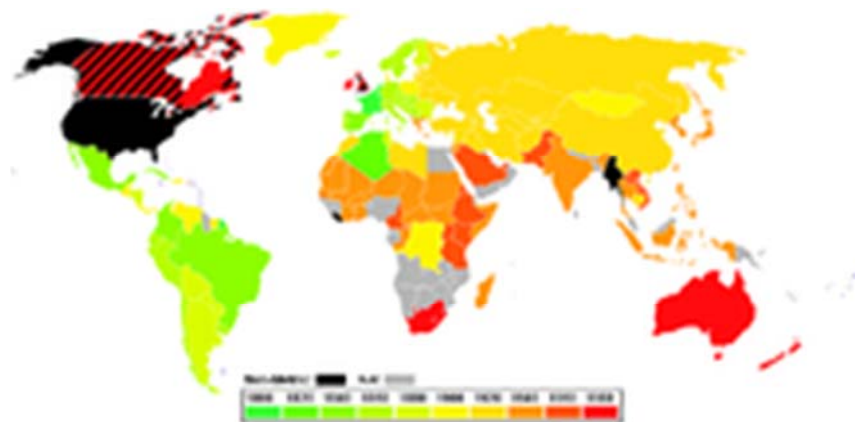
國際單位制的重大里程碑

- **1790** 法國國民議會通過決議，責成法國科學院研究如何建立長度和質量等基本物理量的基準，為統一計量單位打好基礎。（**1668**年首先有人提議）
- **1875**年5月20日 法國政府出面，召開了20個國家政府代表會議，正式簽署了米制公約（Convention du Mètre, Metre Convention），公認米制為國際通用的計量單位。（**1812**年，法國頒布施行「米制」）同時決定成立**國際計量委員會**（Comité international des poids et mesures，簡稱**CIPM**；**International Committee for Weights and Measures**）和國際計量局（Bureau international des poids et mesures，簡稱**BIPM**；International Bureau of Weights and Measures）。

國際計量局總部（巴黎近郊）



世界各國採用公制的發展情況：從 1800 (綠) 到 1980 (紅)。黑色表示尚未採共公制的國家（美國、利比亞及緬甸）。加拿大及英國還常用過去的（呎磅）單位。

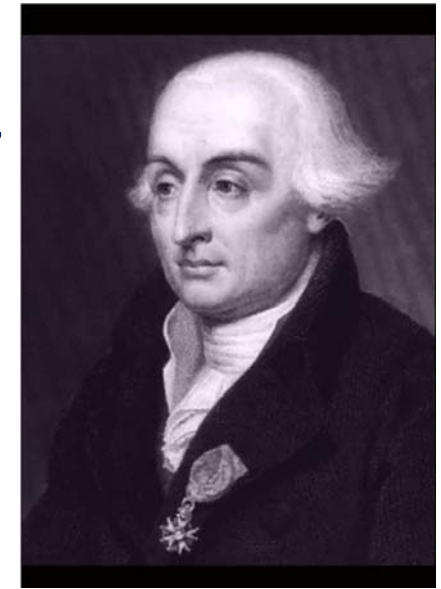


Joseph-Louis Lagrange

拉格朗日 1736 - 1813

生於義大利，後遷至法國。
他的著作 *Mécanique Analytique* (*Analytic Mechanics*, 1788) 是自牛頓以來最完整的古典力學專書；引入變分法，從動能與勢能函而非力出發，建構所謂拉格朗日力學，成為往後算學物理的基礎。

法國大革命後，1791年當選為法國度量衡委員會主席。主持度量衡改革，現代公制與十進位制主要歸功於他。



- **1901** 義大利人喬治（Giovanni Giorgi）提出，如果在長度、時間和質量這三個基本單位之外，再增加一個電學量作為基本單位，就可以建立一種包括力學和整個電磁現象在內的一貫單位制。

建議用 m (meter, 米)、kg (kilogram, 千克)、s (second, 秒) 和 Ω (ohm, 歐姆)。

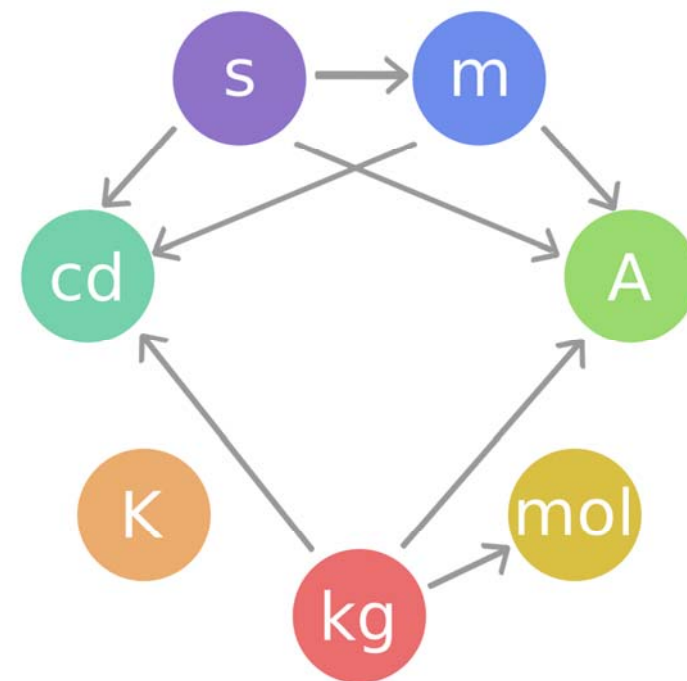
- **1935** CIPM 接受了喬治的建議，但是否定了他把電阻作為第四個基本量的意見，代之以下列更科學、更合理的方案：

1. 真空磁導係數定義為 $4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$ 。此處 N 被引入作為力的新單位。

2. 根據兩平行載流導線之間的力規定 A (安培)。

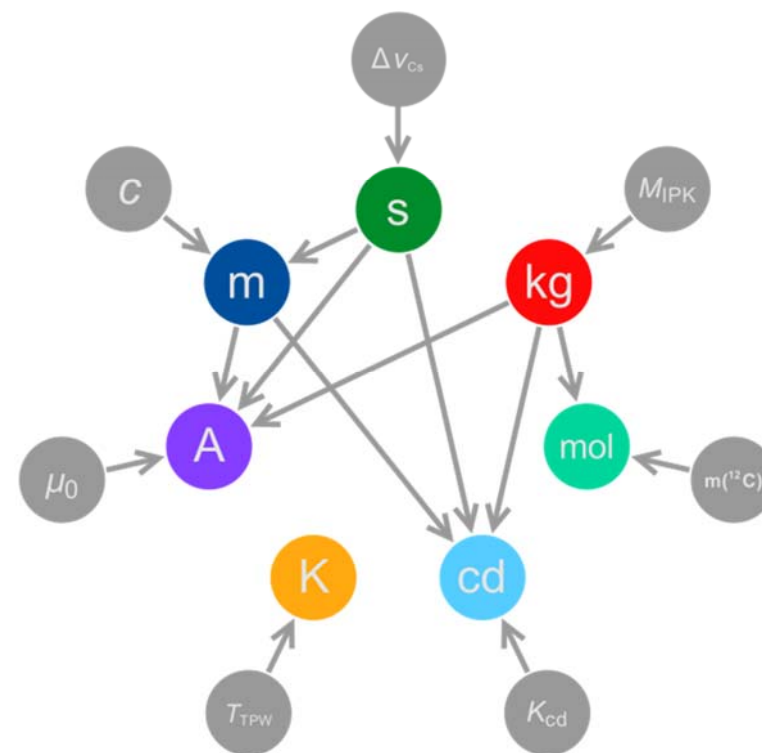
1948 年 CIPM 第 9 屆會議決定正式採用，乃 **MKS** 單位。

- **1954** 第10屆國際計量大會決定將實用單位制擴大為六個基本單位，即 m、kg、s、A、K (kelvin，克耳文) 和 cd (candela，坎德拉，燭光)。
- **1960** 第11屆國際計量大會決定將上述六個基本單位為基礎的單位制命名為國際單位制，並以 SI 表示。
- **1971** 第14屆國際計量大會增補「物質的量」及其單位——mol (mole，莫耳)。
- **1983** 第17屆國際計量大會通過了米的新定義：「米是光在真空中於 $299\,792\,458^{-1}$ 秒的時間內所經路程的長度。」換言之，長度單位成了固定真空光速值的導來單位。
- **2018** 預定在第26屆國際計量大會中，將通過新的單位制，將所有基本單位都從固定值的物理常量導出。



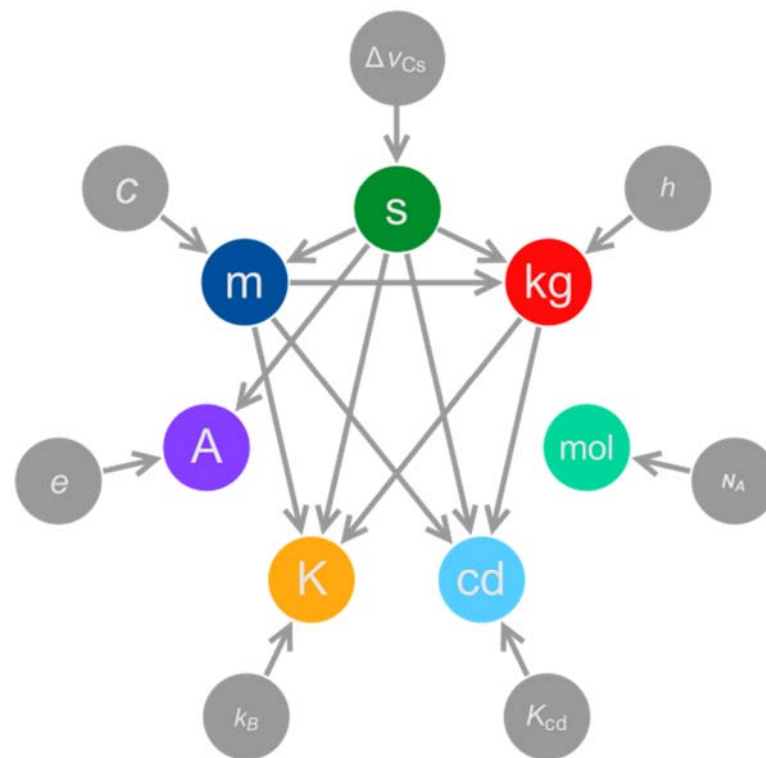
現行 (2017) 國際單位制

- 一基本單位的定義，決定於其它基本單位（例如米的定義就與秒有關）；
- 而這些基本單位需用物理常量及一些人為物（例如千克就用國際千克原型，IPK）作基準。



未來的國際單位制

諸基本單位由一組有固定值的物理常量及其它由同樣一組物理常量導出的基本單位作基準。



14

固定值的物理常量

- 銨-133 原子基態超精細結構的頻率劈裂
 $\Delta\nu_{133\text{Cs}} \equiv 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$
- 真空光速 $c \equiv 299\,792\,458\text{ m/s}$
- 普朗克常量 $h \equiv 6.626\,070\,040 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$
- 基本電荷 $e \equiv 1.602\,176\,620\,8 \times 10^{-19}\text{ C}$
- 波茲曼常量 $k_B \equiv 1.380\,648\,52 \times 10^{-19}\text{ J/K}$
- 阿佛加德羅常量
 $N_A \equiv 6.022\,140\,857 \times 10^{23}\text{ /mol}$
- $540 \times 10^{12}\text{ Hz}$ 單頻光的光視效能為
 $K_{\text{cd}} \equiv 683\text{ lm/W}$ (案: $1\text{ lm} = 1\text{ cd}\cdot\text{sr}$)

15

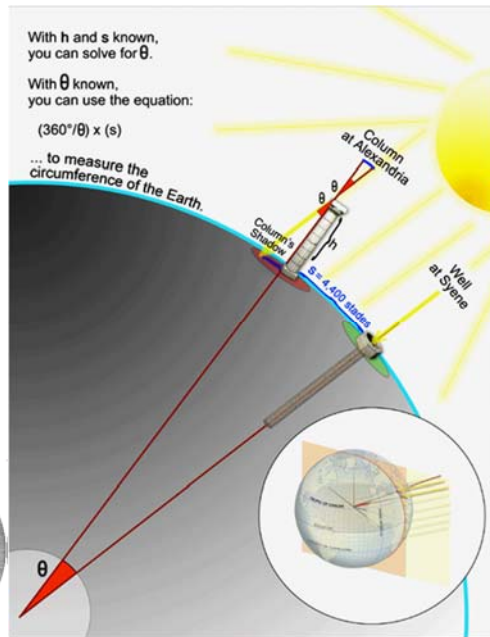
物理量基本單位

- 長度 (meter, m)
- 時間 (second, s)
- 質量 (kilogram, kg)
- 電流 (ampere, A)
- 溫度 (kelvin, K)
- 物量 (mole, mol)
- 光度 (candela, cd)

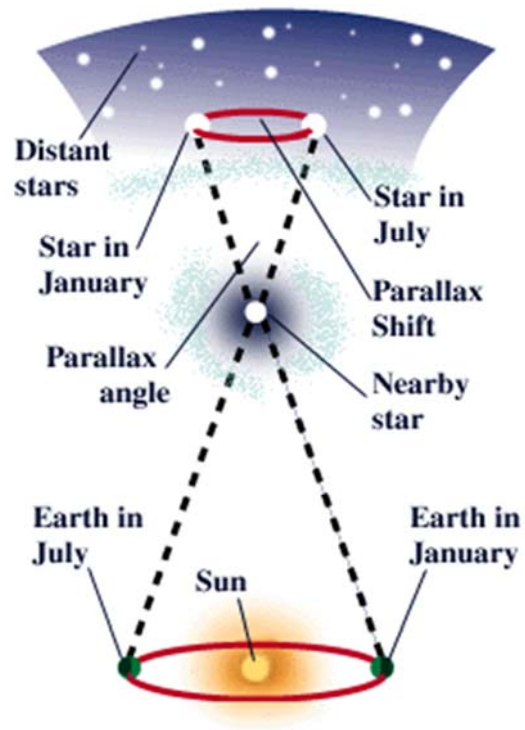
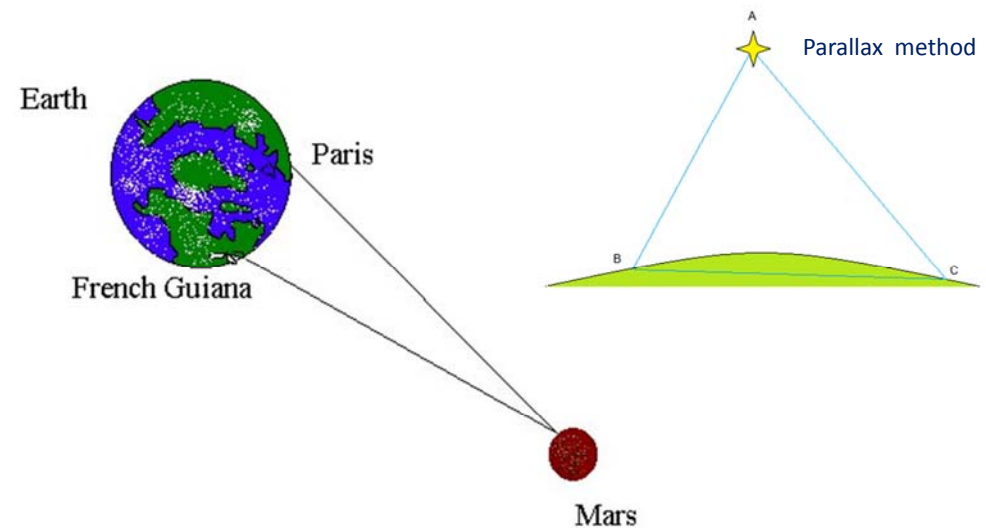


-235 Eratosthenes 測量地球圓周長

夏至，埃及的Syene日正當中；他家鄉 Alexandria（相隔地中海）的日照角約為圓周角的 $1/50$ ($7^{\circ}12'$)。設兩地在同一子午線上，估計兩地距離 5 000 stadia (約 950 km)，可估得每度約 700 stadia，於是周長為 252 000 stadia。

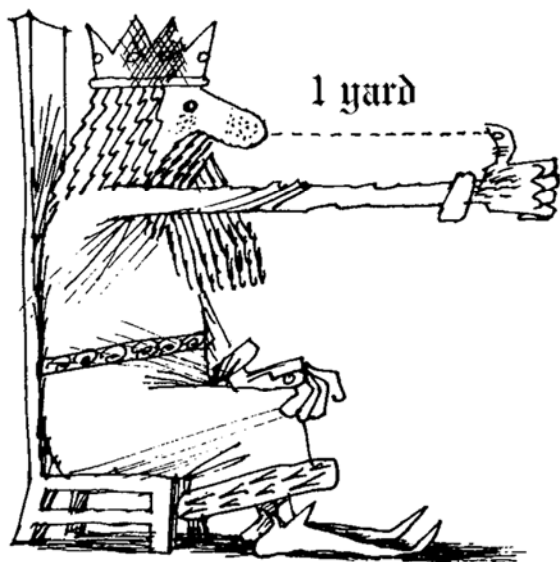


Giovanni Cassini in 1673 a measurement of the distance to Mars



長度單位

- 王肅（195-256）編《孔子家語》：「布指知寸，布手知尺，舒肘知尋。」還有記載說：「十尺為丈，人長八尺，故曰丈夫。」。
- 西方古代「腕尺」，約合 52 厘米～ 53 厘米，與從手的中指尖到肘之間的長度有密切關係。
- 也有用實物作為長度單位依據的。例如，英制中的英寸來源於三粒圓而乾的大麥粒一個接一個排成的長度。英國早期的長度單位碼(yard)則以國王的臂長為準。



21

公尺 (m)

- 1789年，法國大革命。
- 1791年，物理學家拉格朗日 (Lagrange) 當選為法國度量衡委員會主席。
- 1791年法國國民議會通過決議，採用通過巴黎的地球子午線的四分之一的千萬分之一為長度單位，選取古希臘文中 'metron' 一詞作為這個單位的名稱，後來演變為 'meter'，中文譯成「米突」或「米」。
- 此為全球通用的國際長度單位公尺的由來。

22



23

- 從 1792 年開始，法國天文學家用了 7 年時間，測量通過巴黎的地球子午線，並根據測量結果製成了米的鉑質原器，這支米原器一直保存在巴黎檔案局裏。
- 遺憾的是，從事測量工作的天文學家梅尚 (Méchain) 出現了小小失誤（算錯地球的扁平度）；現代，人們通過衛星的精確測量發現，從地球極點到赤道的經線長為 10 002 290 公尺，不是梅尚測量的 10 000 000 公尺。
- 換言之，長度標準單位 1 公尺比規定的長度短了 0.02%。



- 法國度量衡委員會採用兩位科學家的測量結果，用鉑銥合金製成橫截面為H型的標準公尺，作為原器存檔。



25

- 19世紀末，在實驗中找到了自然鎘（Cd）的紅色譜線，具有非常好的清晰度和復現性，在 15°C 的乾燥空氣中，其波長等於 $\lambda_{\text{Cd}} = 6\,438.469\,6 \times 10^{-10} \text{ m}$ 。
- 1927年國際協議，決定用這條譜線作為光譜學的長度標準，並確定 $1 \text{ m} = 1\,553\,164.13 \lambda_{\text{Cd}}$ 。
- 1960年，在第 11 屆國際計量大會上，決定用氪（ ^{86}Kr ）橙線代替鎘紅線，並決定把米的定義改為：「1 m 的長度等於相當於 ^{86}Kr 原子的 $2p_{10}$ 到 $5d_5$ 能階之間躍遷的輻射在真空中波長的 1 650 763.73 倍。

26

時間的單位

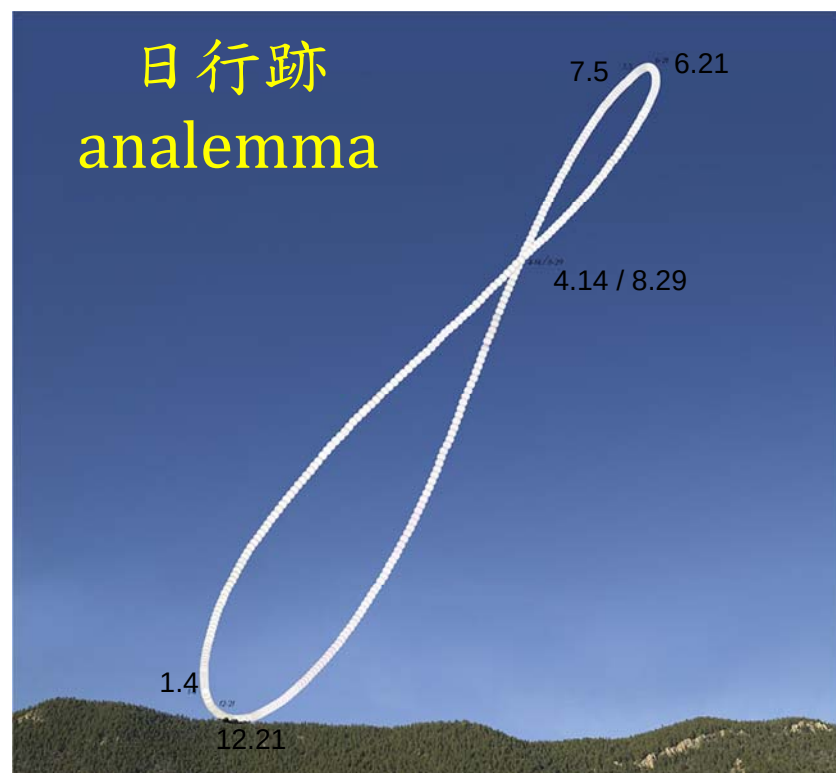
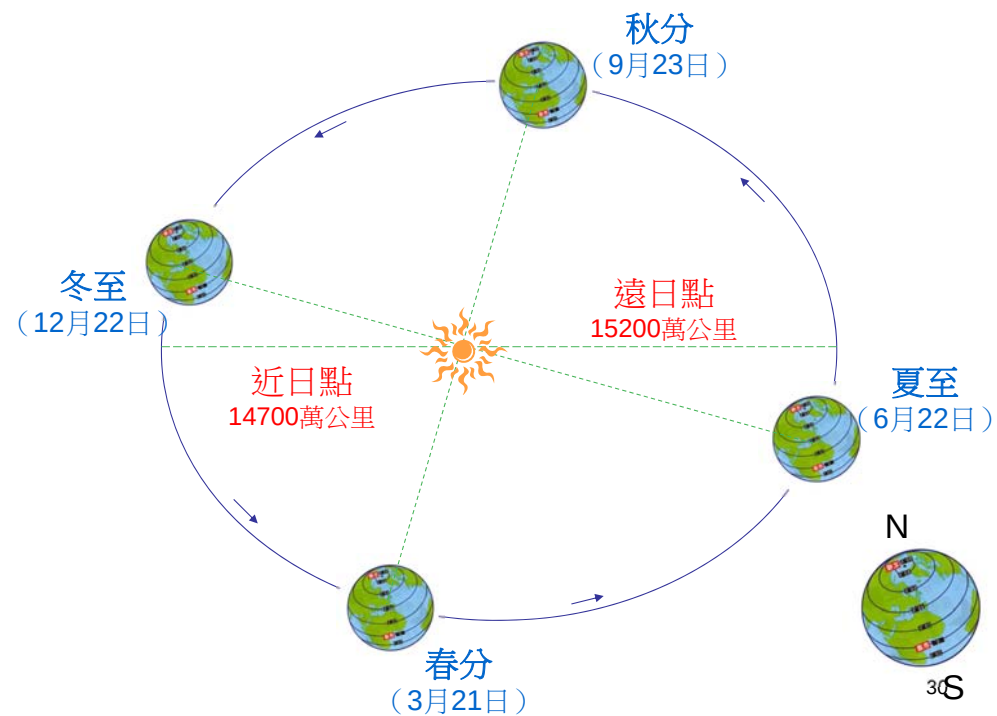
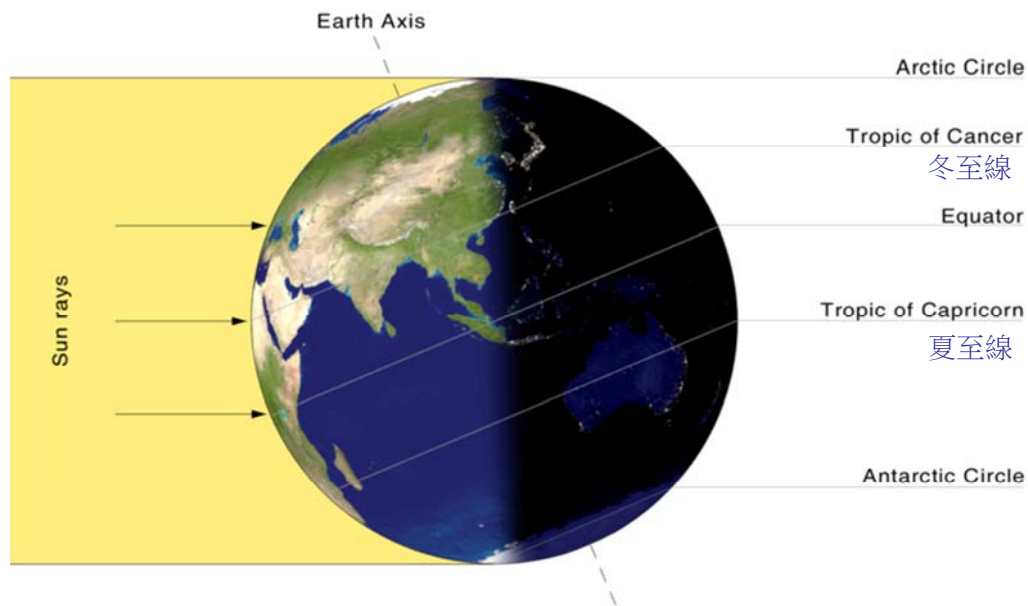


27

最自然而古老的鐘 自轉的地球

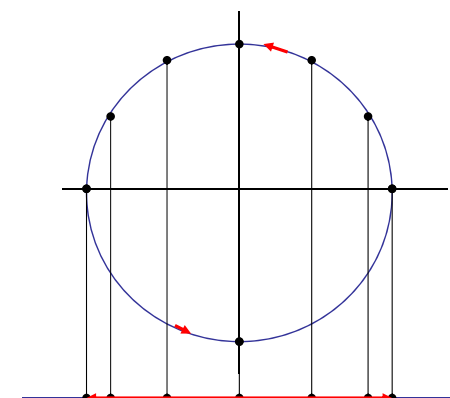
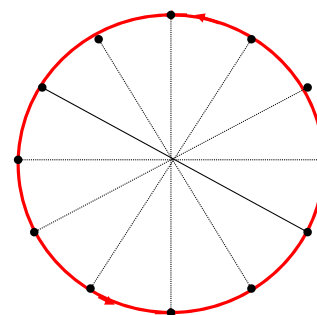
- 自轉一周為一日
- 以太陽為準—太陽日（日出到下一個日出）
- 以恆星為準—恆星日（星空轉一周）
- 1平均太陽日 = 1.002 737 909 35 平均恆星日（1991年）

28



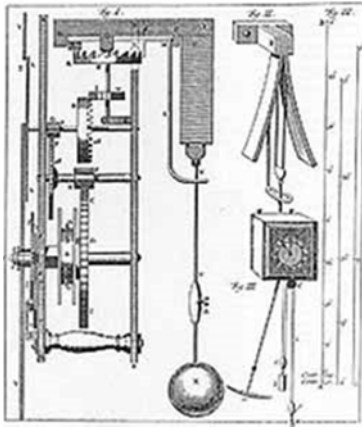
穩定的週期運動

- 均勻圓周運動
- 簡諧運動—均勻圓周運動的投影



海更斯 Christiaan Huygens

- 簡擺的週期 $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$



1629-1695

秒 (s)

- 傳統上 $1s = 86400^{-1}$ 平均太陽日。
- 1960 年 CIPM 確認，把時間基準改為以地球圍繞太陽公轉為依據，即：把秒定義為在 1900 年地球繞太陽沿軌道運行一周所需時間的 $31\,556\,925.9747^{-1}$ 。
- 1967 年第 13 屆國際計量大會重新規定了時間單位的定義：1s 是鉍-133 原子基態的兩個超精細能階之間躍遷所對應的輻射的 $9\,192\,631\,770$ 個週期的持續時間。

1公尺與 1秒的關係

- $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$
- $\pi \approx 3.14$, $g \approx 9.80 \text{ m/s}^2$.
- 1 公尺長的簡擺，半週期約 1 秒。
- 1 公尺與 1 秒都是「宜人」的單位。

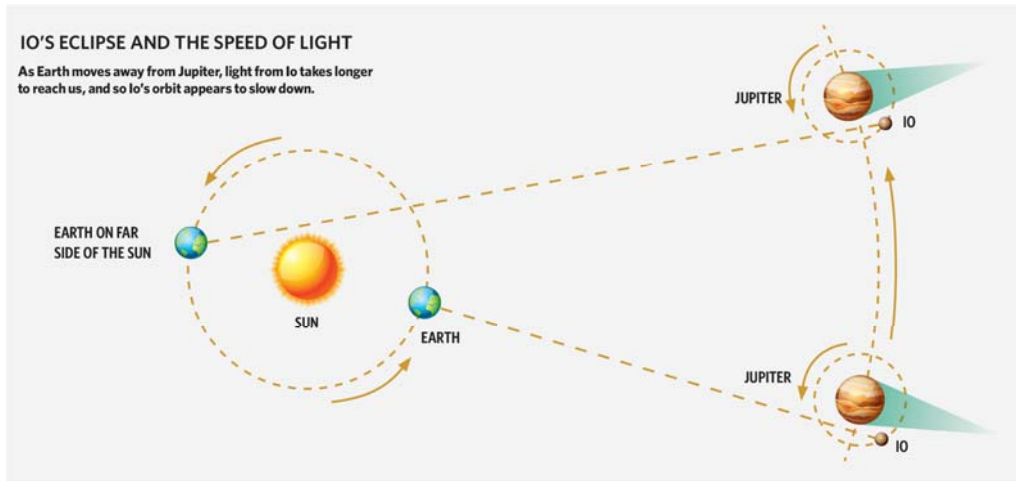
Galileo

測不出光速



1676 Rømer

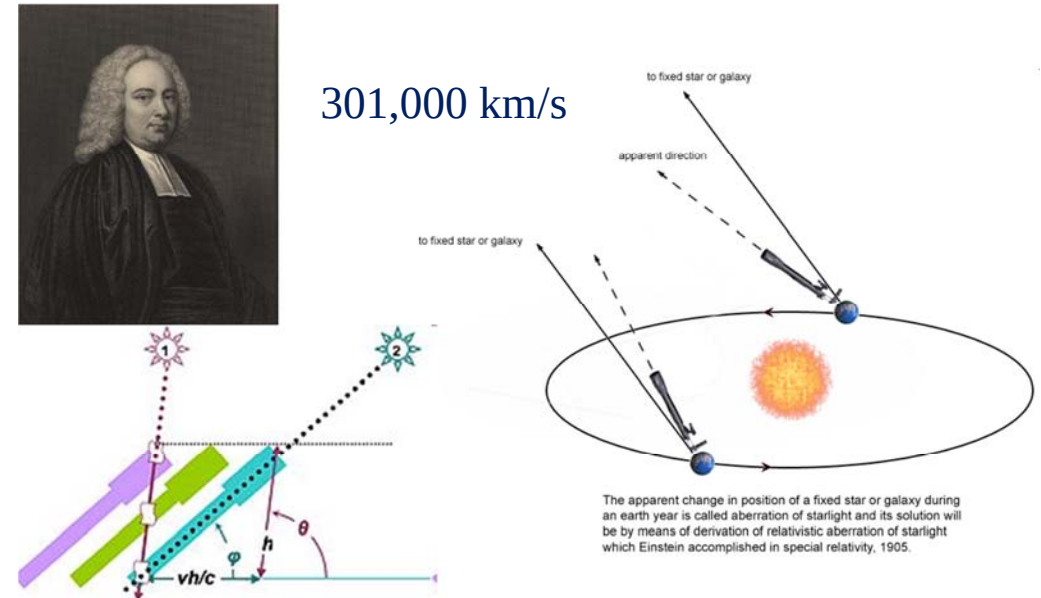
從木星衛星蝕的時間延遲推算光速



Huygens 估算得光速為110,000,000 toises/s, 1 toise $\approx$ 1.949 m。

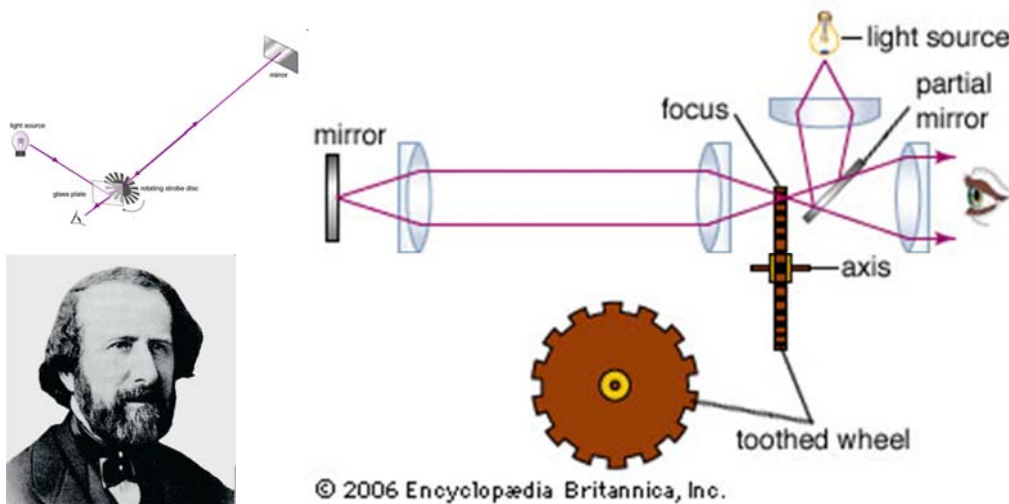
1729 Bradley

從星光的光行差測定光速



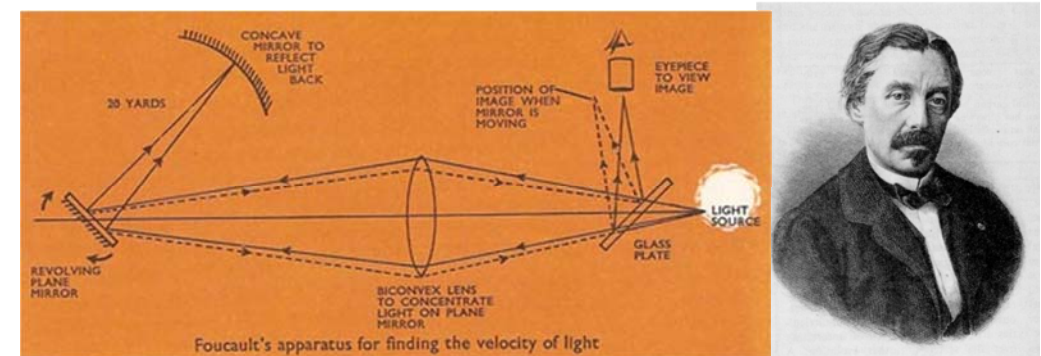
1849 Fizeau 地面上測定光速

- 空氣中光速：313,300 km/s



1850 Foucault 測定水中光速

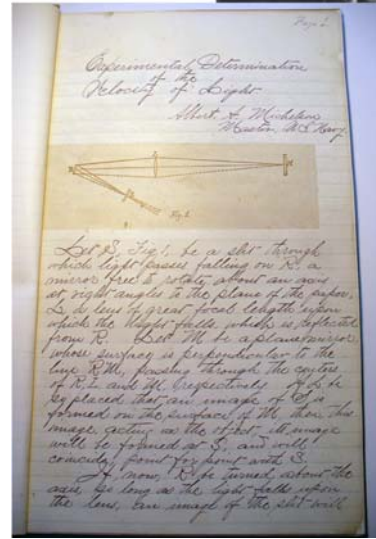
- Foucault 用旋轉鏡方法更準確地測定了光速：298,000 km/s (1862)。
- 發現水中光速較小，支持波動說。



Michelson 測量光速一生 1877-1931



- 1879 測得 $299,910 \pm 50$ km/s。
- 1883 測得 $299,853 \pm 60$ km/s。
- 1926 測得 $299,796 \pm 4$ km/s。
- 1930 開始與 Pease 與 Pearson 合作；1931年逝世，未完成。1935年發表的數據為 $299,774 \pm 11$ km/s。



光速訂為定值

- 1905 年，Einstein 提出相對論，其中假設真空光速恆定。
- 1975 年，真空光速經測為 $299\,792\,458$ m/s，誤差在 4×10^{-9} 之內。
- 1983 年 10 月第 17 屆國際計量大會通過了米的新定義：「1 m 是光在真空中於 $299\,792\,458^{-1}$ 秒的時間間隔內所經路程的長度」。換言之，光速為確定值 $299\,792\,458$ m/s。



千克（公斤 kg）

- 中國秦代度量衡制度中規定：1 石 4 鈞，1 鈞 30 斤，1 斤 16 兩。與現代國際單位制比較，1 斤 約合 0.256 千克。
- 大英帝國曾用純鉑製成磅原器，它是高約 1.35 英寸，直徑 1.15 英寸的純鉑圓柱體。
- 最初的千克質量單位是由 18 世紀末法國採用的長度單位米推導出來的。1 立方分米純水在最大密度（溫度約為 4°C ）時的質量，就定為 1 千克。

- 1799 年法國在製作鉑質米原器的同時，也製成了鉑質千克基準，保存在巴黎檔案局裏。後來發現這個基準並不準確，等於 1.000028 立方分米最大密度純水的質量。
- 在 1875 年米制公約會議之後，也用含鉑 90%、銱 10% 的合金製成千克原器，共三個，選定其中之一作為國際千克原器。
- 國際千克原器保存在特殊的地點，用三層玻璃罩罩好，最外一層玻璃罩裏抽成接近真空，以防空氣和雜質進入。
- 隨後又複製了四十個鉑銱合金圓柱體，分發給各會員國作為國家基準。

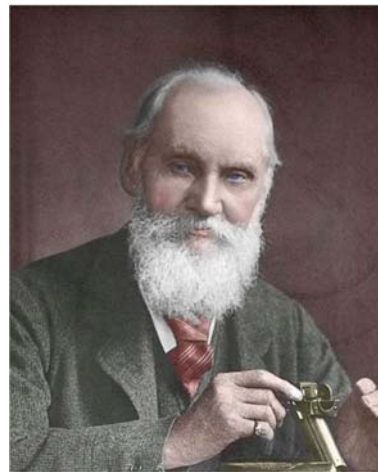
國際千克原器



- 一百多年來國際千克原器主要是用來與工作原器及國家千克原器進行比對。
- 大規模的比對在歷史上只進行過四次：1899-1901 年間；1939 年；1948-1953 年間；1988- 1992 年。各國同時把自己的國家千克原器運到巴黎，按照國際協議的方案進行嚴格的清洗處理，再與國際千克原器進行稱衡比對。
- 耗費的人力、物力、財力可想而知。
- 經由約瑟夫森效應測定普朗克常量，或者利用雙頻雷射測定阿佛加德羅常量。當不確定度能夠低於 1×10^{-8} ，就可以宣佈廢除基本物理單位中此一最後一個實物基準。

溫標與克耳文 (K)

- 熱學發展史中出現過華氏溫標、列氏溫標、蘭氏溫標、攝氏溫標、氣體溫標和熱力學溫標等。
- 熱力學溫標是 1848 年克耳文首先提出的，由熱力學溫標定義的熱力學溫度具有最嚴格的科學意義。
- 以氣體溫度計標定溫度所構成的氣體溫標最接近熱力學溫標。



- 早在 1887 年，CIPM 就曾決定採用定容氫氣體溫度計作為國際實用溫標的基礎。
- 1927 年 第 7 屆國際計量大會決議採用鉑電阻溫度計等作為溫標的內插儀器，並規定在氧的凝固點 (-182.97°C) 到金凝固點 (1063°C) 之間確定一系列可重複的溫度或固定點。
- 1948 年 第 11 屆國際計量大會對國際實用溫標作了若干重要修訂。例如：以金熔點代替金凝固點，引用更精確的常量值，計算公式更為精確，光測高溫計的測量限值擴大等等。



- 1960 年把水的三相點作為唯一的定義點，規定其絕對溫度值為 273.16 K（精確），以代替原來水的冰點溫度為 0.00 °C（精確）之規定。而水的冰點根據實測，應為 $(273.1500 \pm 0.0001 \text{ K})$ 。
- 1990 年元旦起開始在全世界範圍內採用重新修訂的國際溫標，這一次取名為 1990 年國際溫標，代號為 ITS-90。
- 和 IPTS-68 相比較，100 °C 時偏低 0.026 °C，即標準狀態下水的沸點已不再是 100°C，而是 99.974 °C。



- 1861 年，英國的布萊特和克拉克倡議建立一種統一的實用單位。於是這一年英國科學促進會成立了以 W. 湯姆森為首的六人電標準委員會，期統一電阻和電容的標準，建立恰當的實用單位，並確定絕對單位和實用單位的換算關係。
- 在六人電標準委員會的倡議下，英國科學促進會決定：電阻用歐姆（ohm）；電勢用伏特（volt）。
- 1881 年巴黎第一屆國際電學家大會決定再增加電流的實用單位：安培（ampere）。還引入了電量的實用單位—庫倫（coulomb）和電容的實用單位—法拉（farad）。這樣就形成了電磁量中的第三套單位制，即實用單位制。

電磁單位與安培（A）

- 1832 年，高斯（Carl Friedrich Gauss，1777–1855）提出了一種以毫米、毫克和秒為基本單位的絕對電磁單位制。
- 但電磁量實際上可以由兩個互不相容的方程系來描述：一個是靜電學的庫倫定律，一個是靜磁學的庫倫定律。於是出現了兩種「絕對」電磁學單位（esu 與 emu）。



- 1891 年佩里（John Perry，1850–1920）建議，如果取真空磁導係數 $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ ，就可以使電磁學公式得到更簡潔的表達式。這就是 1935 年 CIPM 作出以安培作為第四個基本單位的歷史背景。
- 1946 年 CIPM 作出如下決議：「安培是一恆定電流，若保持在處於真空中相距 1m 的兩無限長而圓截面可忽略的平行直導線內，則此兩導線之間產生的力在每米長度上等於 $1 \times 10^{-7} \text{ N}$ 。」

這一決議 1948 年得到了第 9 屆國際計量大會的批准。



新發展

- 1962 年發現的約瑟夫森效應 (Josephson effect) 和 1980 年馮·克利青 (Klaus von Klitzing) 發現的量子霍爾效應 (quantum Hall effect) 為電磁計量帶來了新的生機。
- 電子對穿透約瑟夫森結的勢壘時，能量差 $2eV_J$ 與電磁波的頻率 ν 的關係為 $V_J = n \frac{h}{2e} \nu$ 。
- 其中普朗克常量 h 和基本電荷 e 都是可以精確測定的基本物理常量，正整數 $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ 。

- 這樣，就可以建立一種準確度遠遠高於傳統的實物基準的量子電壓基準——約瑟夫森量子電壓基準。
- 量子霍爾效應是半導體介面上的二維電子氣在強磁場和超低溫環境下表現出的又一種宏觀量子效應。當二維電子氣充滿某一朗道能階時，在霍爾電壓曲線上會出現平臺，平臺處的霍爾電阻也與普朗克常數 h 及基本電荷 e 有關： $R_H = n \frac{h}{ie^2}$ ，其中 i 也為正整數 $1, 2, 3, \dots$ 。



- CIPM 下屬的電學諮詢委員會 (CCE) 在 1986 年的第 17 屆會議上決定：從 1990 年元旦起，以量子霍爾效應所得的霍爾電阻來代表歐姆的國家參考標準，並以約瑟夫森效應所得的頻率-電壓比來代表伏特的國家參考標準。
- 1988 年 CCE 第 18 屆會議正式建議將第一階 ($i = 1$) 霍爾平臺相應的電阻值定義為馮·克利青常數，以 R_K 表示，並通過了如下決議：精確地取 $25\,812.807\,\Omega$ 作為馮·克利青常數的約定值，以 R_{K-90} 表示之；從 1990 年元旦起施行。
- 採用新方法後，電壓單位和電阻單位的穩定性和復現準確度提高了 2~3 個數量級。

物量 (mol) 及光度 (cd)

- 1971 年第 14 屆國際計量大會增補了一個基本量和單位，這就是「物量」及其單位——莫耳。決議為：「莫耳 (mol) 是一系統的物量，該系統中所包含的基本單元數與 $0.012\,\text{kg}$ 碳-12 的原子數目相等。」
- 1979 年第 16 屆國際計量大會又作出決議：「坎德拉 (candela, cd) 是一光源在給定方向上的發光強度，該光源發出頻率為 $540 \times 10^{12}\,\text{Hz}$ 的單色輻射，且在此方向上的輻射強度為 $683^{-1}\,\text{W/sr}$ 。」

2018後 物理常量與基本單位間的關係

- $\Delta\nu_{133}\text{Cs} \equiv 9\,192\,631\,770\,\text{s}^{-1}$
- $c \equiv 299\,792\,458\,\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $h \equiv 6.626\,070\,040 \times 10^{-34}\,\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- $e \equiv 1.602\,176\,620\,8 \times 10^{-19}\,\text{A} \cdot \text{s}$
- $k_{\text{B}} \equiv 1.380\,648\,52 \times 10^{-19}\,\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- $N_{\text{A}} \equiv 6.022\,140\,857 \times 10^{23}\,\text{mol}^{-1}$
- $K_{\text{cd}} \equiv 683\,\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$



請指教



普朗克常量的測量

2017/10/28 物理學史研習會

鄭宜帆



(中央研究院 & 清華大學)



普朗克常量／常數 (Planck constant)

——由普朗克於1900年因著對黑體輻射的研究而提出

時代背景

- 十九世紀初期，拿破崙於戰爭中失敗。歐洲39個主權邦組成了政治鬆散的德意志邦聯。
- 開始有知識份子思考建立一個具備中央集權政府的德意志民族國家。
- 1962年，普魯士王威廉一世任命俾斯麥為首相，先後打了三場戰爭，於1871年成立德意志帝國。之後，德意志帝國的軍事力量逐步擴張。



時代背景

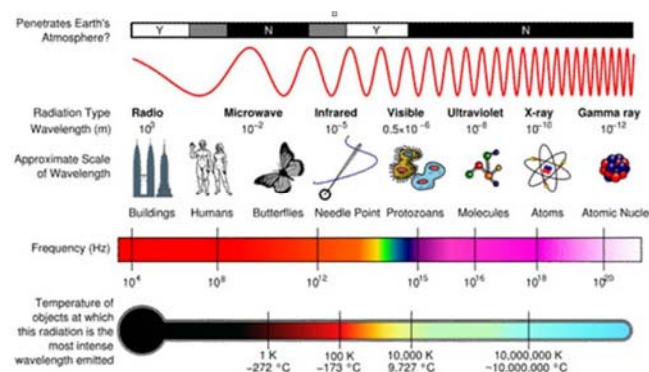
- 因應時代需求，如何製造高品質的鋼鐵成了重要課題。
- 傳統上，這必須仰賴工人的經驗判斷，以正確控制鼓風爐的溫度。
- 探討物體溫度和電磁輻射的關係極為重要。



黑體輻射

- 黑體能夠吸收所有外來的電磁輻射，成為絕佳的研究材料。

- 黑體輻射僅跟溫度有關。

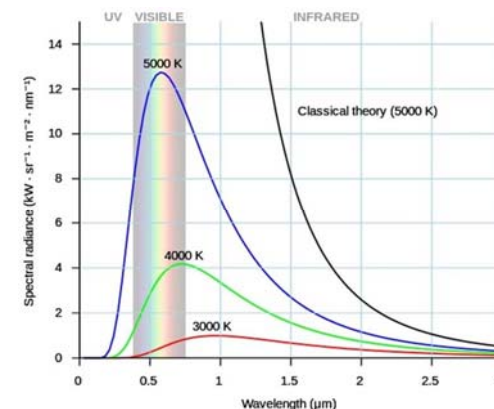


黑體輻射

- 1900年，普朗克假設黑體裡虛擬震盪子 (virtual oscillator) 的能量只能是某個最小單位的整數倍 $E = nh\nu$ ，成功解決黑體輻射問題。

- h 稱為普朗克常量， $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

- 普朗克認為自己解決黑體輻射的方式只是個數學技巧。

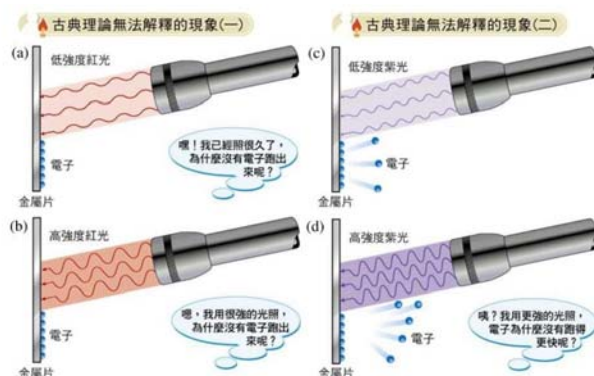


光電效應

- 1905年愛因斯坦採用普朗克的假設，以解釋光電效應。

- 與普朗克不同，愛因斯坦認為，電磁波的能量本身就是量子化的。

- 事實上，普朗克對愛因斯坦的挑戰與質疑相當不悅。

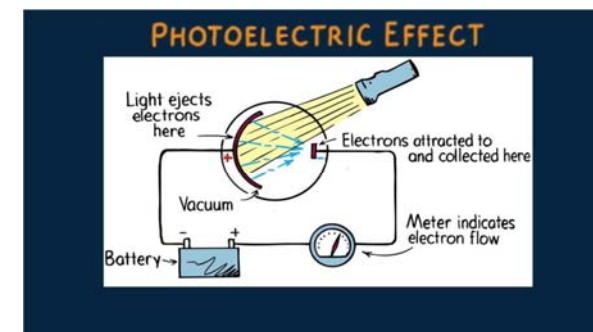


光電效應和普朗克常量

- 利用光電效應，我們可以測量普朗克常量和電子電荷的比值：

$$eV = h\nu - W$$

- 密立根堅信愛因斯坦的理論是錯誤的，並花費多年時間進行光電效應的實驗研究。



普朗克常量的測量

- 1913年，密立根整合當時所有的物理常量數據，推估出相當精確的普朗克常量數值。
- 這也是首次物理常量的數據整合。這項工作現在由1966年成立的科學技術數據委員會（CODATA）接手。
- 1914年密立根發表普朗克常量的首次實驗值：

$$h = 6.57 \times 10^{-34} \text{Js}$$

Vol. VII.] PHOTOELECTRIC DETERMINATION OF PLANCK'S "h." 355

A DIRECT PHOTOELECTRIC DETERMINATION OF PLANCK'S "h."

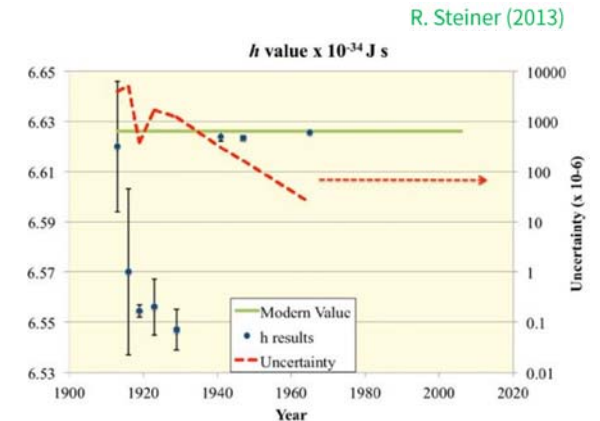
BY K. A. MILLIKAN.

I. INTRODUCTORY.

QUANTUM theory was not originally developed 'for the sake of' interpreting photoelectric phenomena. It was solely a theory as to the mechanism of absorption and emission of electromagnetic waves by resonators of atomic or subatomic dimensions. It had nothing whatever to say about the energy of an escaping electron or about the conditions under which such an electron could make its escape, and up to this day the form of the theory developed by its author has not been able to account satisfactorily for the photoelectric facts presented herewith. We are confronted, however, by the astonishing situation that these facts were correctly and exactly predicted nine years ago by a form of quantum theory which has now been pretty generally abandoned.

光電效應和普朗克常量

- 早期的普朗克常量測量，實驗誤差通常很大。
- 功函數與材料性質有關。
- 密立根油滴實驗也會受到空氣黏滯係數影響，造成電子電荷值的誤差。

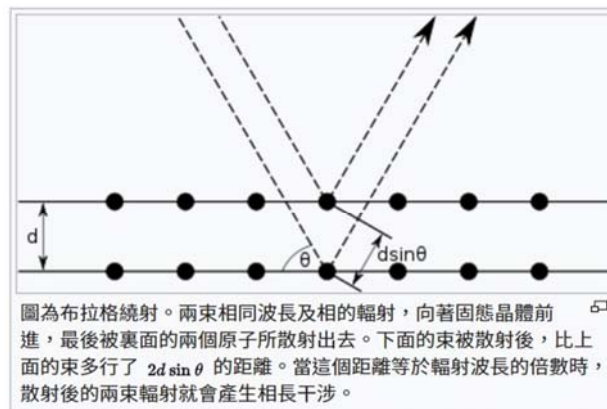


X射線法

- 受到加熱的陰極放出電子；電子撞擊陽極產生X射線：
- X光的波長由布拉格繞射（Bragg diffraction）決定：

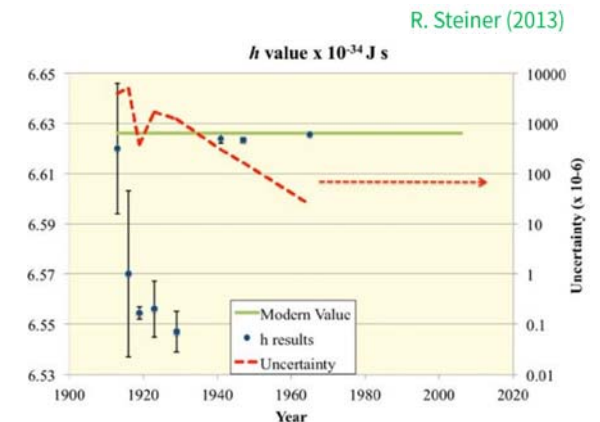
$$eV = h\nu = hc/\lambda$$

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$



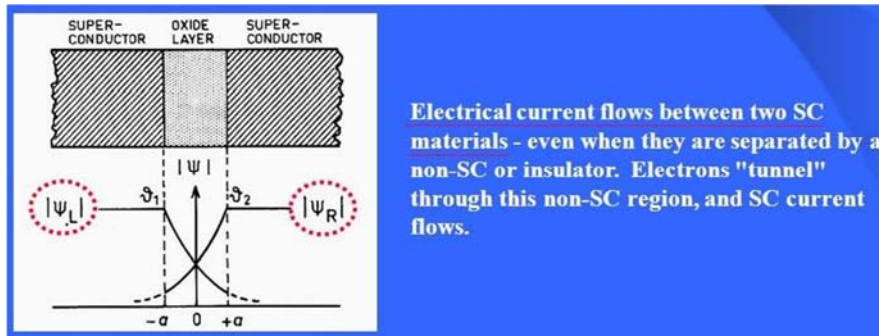
光電效應和普朗克常量

- 隨著實驗的進步，到了1963年，普朗克常數的值為 $h = 6.62559(16) \times 10^{-34} \text{Js}$
- 1963年的結果已非常接近現代的數值。



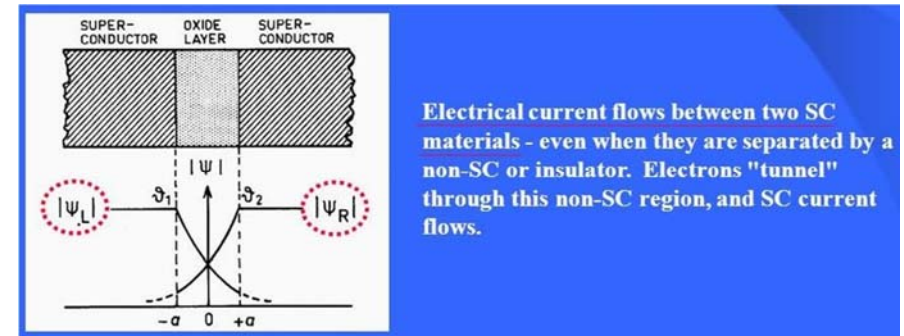
約瑟夫森效應

- 1962年，Brian Josephson 預測了約瑟夫森效應的存在（1973諾貝爾物理獎）。
- 即使界面兩邊沒有任何電位差，量子穿隧效應仍會造成電流。



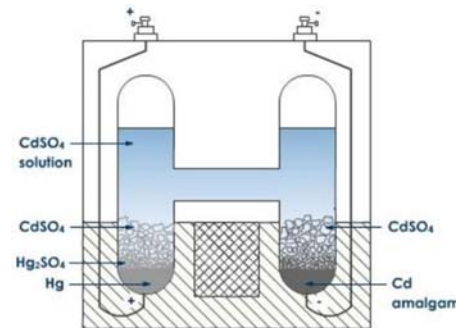
約瑟夫森效應

- 若以頻率 f 的電磁波照射界面，會產生固定電壓 $V = nf \frac{h}{2e}$ 。



約瑟夫森效應裡的電壓

- 當時電壓測量相對較為精確。從1911到1990年，國際電壓標準乃利用數十個到上百個1.018V的韋斯頓電池，從平均電壓求得「伏特」的標準數值。
- 約瑟夫森效應成為測量「普朗克常數和基本電荷比值」的好方法。
- 隨著伏特、安培和歐姆標準值測量技術的進步，普朗克常量的測量變得益發準確。



基本單位的定義

- 反過來說，約瑟夫森效應也可以成為計算「伏特」標準值的方法。1972年，各國開始採用約瑟夫森效應作為伏特標準值的計算方式之一。
- 以往，公斤、公尺、秒等基本單位是在歷史中被人為地定義。
- 現在我們可以改用不會隨時間改變的自然常數來重新定義基本單位。
- 目前的伏特參考標準在1990年開始使用。



其他方法

- 到了1980年代後期，已經有許多不同方法可以測量普朗克常量。
- 利用其他常量和普朗克常量的關係式，便可以藉由測量其他常量來得到普朗克常量的數值。

其他方法

- 舉例來說：亞佛加厥常數、質子旋磁比（gyromagnetic ratio of proton）、法拉第常數等。

R. Steiner (2013)

Table 1. List of inferred values for h from different measurement techniques.

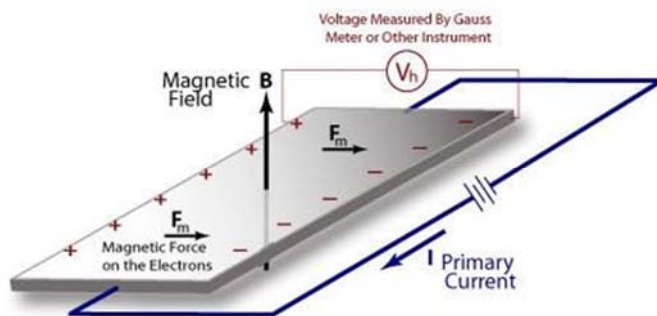
Planck h value	Relative standard uncertainty ($\times 10^{-6}$)	Method	Source
$6.626071(11) \times 10^{-34} \text{ J s}$	1.6	$\Gamma_{\rho-90}(\text{H})$	NIM-1995 [69]
$6.6260729(67) \times 10^{-34} \text{ J s}$	1.0	$\Gamma_{\rho-90}(\text{H})$	NPL-1979 [70]
$6.6260657(88) \times 10^{-34} \text{ J s}$	1.3	F_{90}	NIST-1980 [71]
$6.6260684(36) \times 10^{-34} \text{ J s}$	0.54	K_J	NMI-1989 [72]
$6.6260670(36) \times 10^{-34} \text{ J s}$	0.63	K_J	PTB-1991 [74]

量子霍爾效應

- 1980年，Klitzing 發現量子霍爾效應（1985年諾貝爾物理獎），在低溫高磁場下：

$$n = \frac{h}{e^2 R}$$

- 藉由整數量子霍爾效應，可以得到電阻和普朗克常量的關係式。



普朗克常量的直接測量

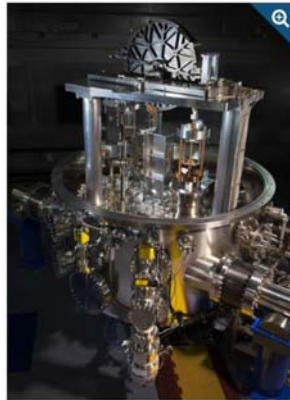
- 將量子霍爾效應和約瑟夫森效應的方程式合併，我們便能直接測量普朗克常量：

$$n = \frac{h}{e^2 R}$$

$$V = nf\left(\frac{h}{2e}\right) \quad \rightarrow \quad \frac{V^2}{R} = \frac{f^2 h}{4}$$

瓦特天平

- 雖然直接測量普朗克常量的方式不只一種，近年來最主流的方式乃是利用瓦特天平（Watt Balance, Kibble Balance）。
- 瓦特天平實驗至少包含兩種不同模式：移動模式和秤重模式



The NIST-4 watt balance has measured Planck's constant to within 34 parts per billion, demonstrating that the high-tech scale is accurate enough to assist with 2018's planned redefinition of the kilogram.
Credit: J. L. Lee / NIST

移動模式

- 根據法拉第定律，線圈上下兩端產生電位差：

$$\varepsilon = \oint_c \mathbf{B} \cdot (\mathbf{v} \times d\mathbf{r}) = v_z B(z) L$$

- 感應電動勢可利用約瑟夫森效應 $\varepsilon = f(\frac{h}{2e})$ 得出

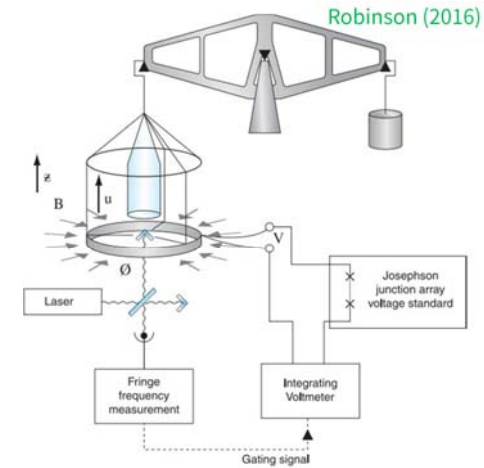


Figure 2. The Kibble balance in moving mode.

秤重模式

- 根據安培定律，線圈受到電磁力：

$$\mathbf{F} = m\mathbf{g} = \oint_c I (d\mathbf{r} \times \mathbf{B}); F_z = IB(z)L$$

- 電流 I 可利用約瑟夫森效應得出

$$I = f' \left(\frac{h}{2e} \right) \frac{ne^2}{h} = \frac{nef'}{2}$$

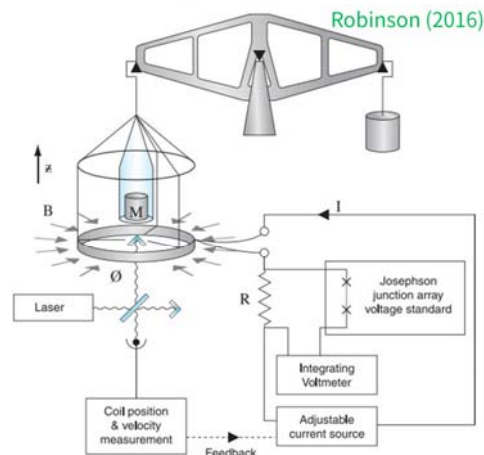
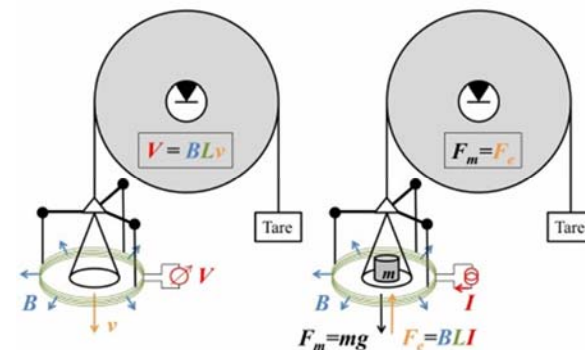


Figure 1. The Kibble balance in weighing mode.

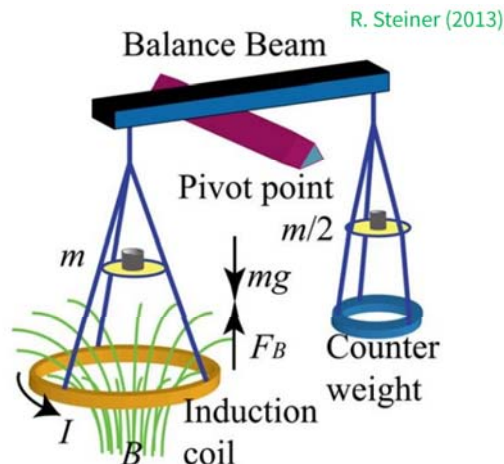
測得普朗克常量

- 合併兩種模式的方程式，可以得到 $mgv_z = \varepsilon I = \frac{hff'n}{4}$ 。



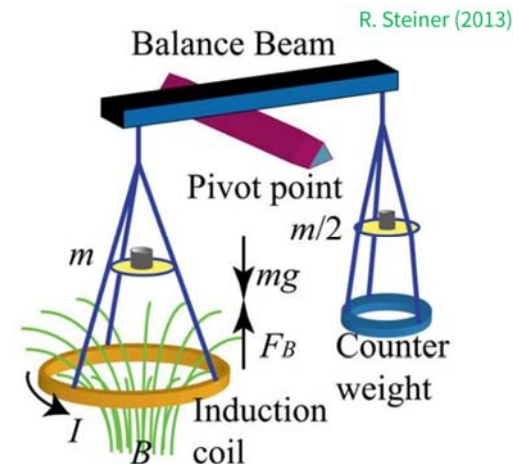
減少誤差

- 分成兩個模式分開測量可以避免 $B(z)L$ 兩個參數在過程中產生的誤差。
- 天平的懸臂必須精細調校，盡量減少水平移動分量，只能垂直移動。
- 磁場和 r 成反比，且不因角度變化，垂直方向靠平衡點處也必須盡量保持均勻。
→ 避免受力隨線圈位置、半徑、形狀不完美或熱膨脹產生變化。



減少誤差

- 還沒放上砝碼 m 前，向下電磁力和另一端 $m/2$ 平衡。
- 放上砝碼 m 之後，反轉電流，讓向上電磁力和砝碼重平衡。
- 前後步驟電流大小均沒有改變，避免造成線圈受熱不同產生微量體積變化。
- 懸臂可能因張力產生細微長度變化。



公斤和普朗克常量

- 目前公斤的標準值是以鉑銱合金的公斤標準砝碼為準；然而，公斤原器在使用一百多年後的現在，質量開始產生些微變化。
- 可能是受到空氣中的污染物影響，或是製造過程中的污染物被釋放，導致質量變化。

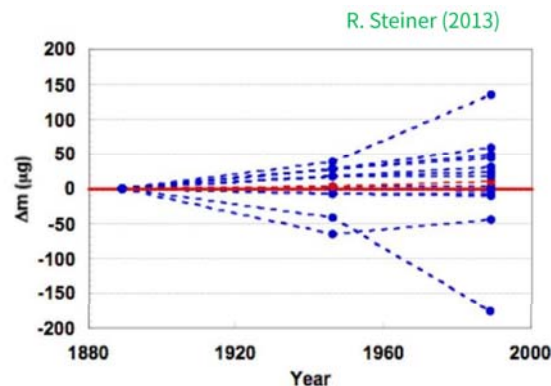


Figure 10. The relative drift several of the kilogram PtIr copies. IPK is by definition the zero axis line.

公斤和普朗克常量

- 瓦特天平利用已知質量測出普朗克常量。
- 質量標準發生變化意味著測到的普朗克常量會隨時間改變。

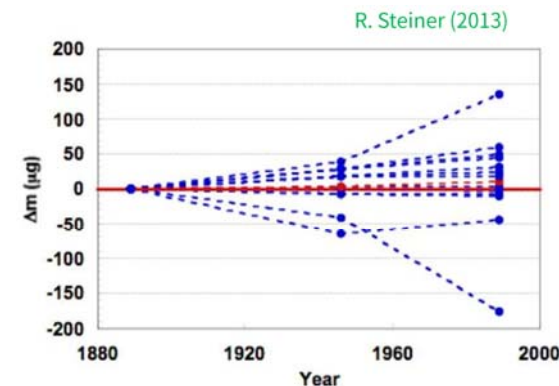


Figure 10. The relative drift several of the kilogram PtIr copies. IPK is by definition the zero axis line.

公斤和普朗克常量

- 2011年的國際度量衡大會，同意公斤將改用普朗克常量表示。
- 這項工作至今尚未完成，預計在2018年實施。
- 亦有草案將所有基本單位均用自然界基礎常數表示。

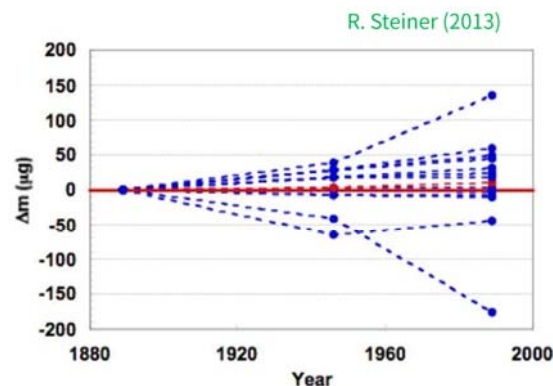
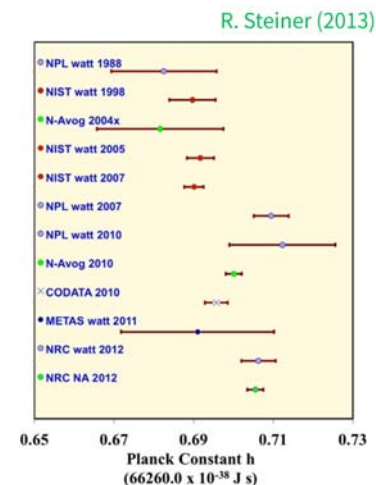


Figure 10. The relative drift several of the kilogram PtIr copies. IPK is by definition the zero axis line.

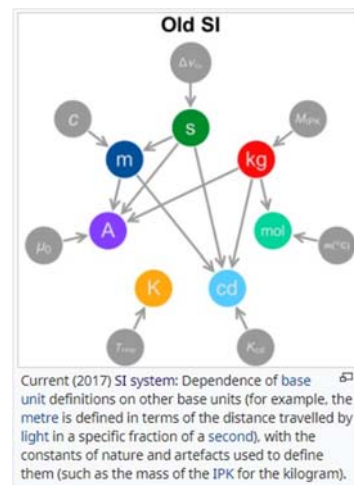
公斤和普朗克常量

- 近期的普朗克常量測量尚有一些不吻合之處。
- 差異的幅度仍大。
- 2018年國際度量衡大會預計將會決定普朗克常量的最終參考值，並利用其定義公斤。



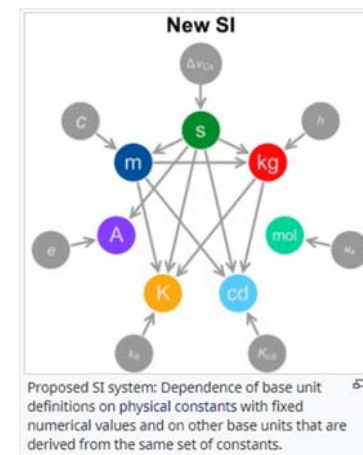
國際單位制的革新

- 質量、長度、時間、電流、溫度、物質質量、發光強度，這七個物理現象的單位定義為「公斤 (kg)、公尺 (m)、秒 (s)、安培 (A)、克耳文 (K)、莫耳 (mol) 和燭光 (cd)」
- 其中，公尺、秒、燭光已經由物理常量定義。



國際單位制的革新

- 革新草案中，安培、克耳文和莫耳改由基本電荷、波茲曼常數和亞佛加厥常數定義。
- 不過，仍有須多批評和爭議需要處理。



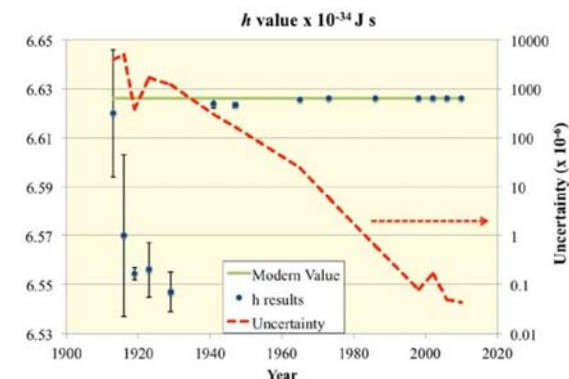
未竟之處

- 作為普朗克常量的測量方式，瓦特天平仍然不讓人完全滿意。
- 它需要重力和電磁力的平衡。
- 在無重力的地方將無法進行實驗。



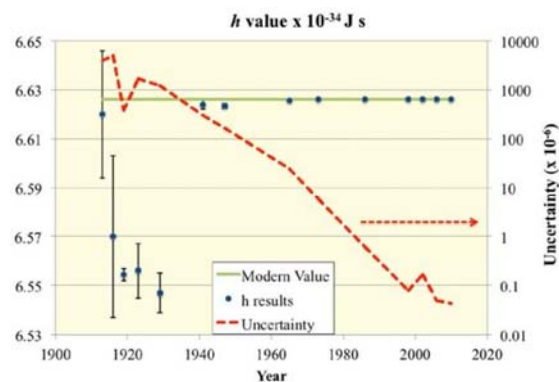
結論

- 從一百多年前到現在，普朗克常量的測量有爆炸性的進步。
- 實驗的誤差，從早期的空氣黏滯係數，到後來伏特、歐姆的標準值修正，都有影響。
- 普朗克常量的近期測量實驗，仍有若干不吻合之處待解決。



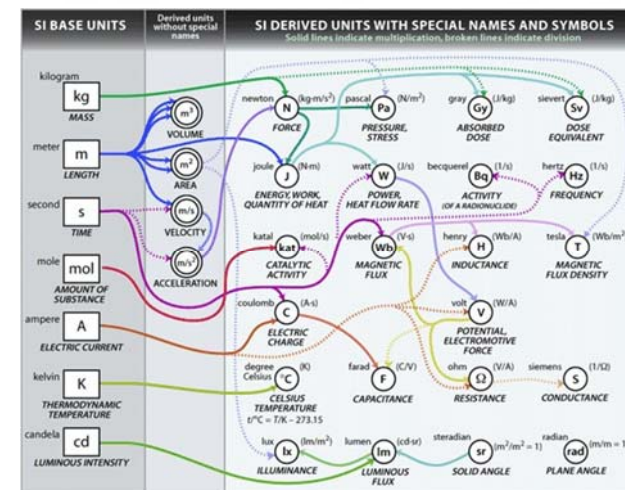
結論

- 未來普朗克常量的測量仍有進步的空間。
- 增強基本單位的校準能力→更好的單位標準→幫助我們設計更精確的實驗設備→更加精確的校準。



結論

- 物理常量的測量，往往牽一髮動全身。
- 特定單位、常量的數值調整，都可能影響到其他常量的數值。
- 每好些年，就要重新全盤調整數值一次。



結論

- 標準數值的事關重大，也不能夠輕易調整。
- 1969年，可能因為當時安培的測量普遍不夠準確，國際度量衡局將一伏特的標準值降低 $11\mu\text{V}$ 。
- 到了1980年代，許多測量實驗發現標準值不太準確；1990年，伏特和歐姆的標準值再度調整。
- 當時市面上已有相當精確的伏特計可買，為此，全球所有伏特計都需要重新校對。工業界對此相當頭大。

結論

- 普朗克常量的測量，是與其他物理常量的測量產生關係的過程，也是量測技術互相進步的過程。
- 量測的進步通常不是線性的，而會隨著新發現產生躍遷式的進步。
- 新發現非馬上可用，需要經過多年的反覆確認。量測的進步不是即時的，而是不斷進行的過程，仰賴許多人在背後的努力。

精益求精

精密測量與諾貝爾物理獎

李精益

文藻外語大學通識教育中心

時間：106年10月28日

地點：東吳大學物理學系

Email：polanyi.lee@gmail.com

與精密測量有關的[部分]諾貝爾物理[學]獎

1907年 A. A. Michelson 精密光學儀器、計量學研究

1920年 Charles Guillaume 鎳鋼合金用於精密計量

1930年 C. V. Raman 光散射的研究及發現拉曼效應

1961年 Rudolf Mössbauer 發現穆斯堡爾效應

1966年 Alfred Kastler 光磁共振和光抽運技術

1989年 Ramsey、Dehmelt、Paul 原子鐘和離子阱技術

1994年 Brockhouse、Shull 中子譜學和中子繞射技術

1997年 朱棣文、Cohen-Tannoudji、Phillips

雷射冷卻和捕獲原子的方法

2005年 J. L. Hall、T. W. Hänsch 基於雷射的精密光譜學

2012年 Haroche、Wineland 量測和操控單個量子系統

2017年 Weiss、Barish、Thorne LIGO及引力波探測

諾貝爾物理學獎的分佈統計

自1901年到2017年的117年中，諾貝爾物理學獎有6屆由於世界大戰和經濟蕭條而沒有頒發（1916年、1931年、1934年和1940–1942年）。所以物理學獎實際上只頒發了111屆，共有207人次、206位科學家獲得過諾貝爾物理學獎。其中美國物理學家巴丁（John Bardeen，1908–1991）是唯一兩度獲得諾貝爾物理學獎的人。

諾貝爾物理學獎如果按理論方面和實驗方面來劃分，初步統計，理論方面為66人次，實驗方面為141人次，其中一些項目是兼有理論和實驗。可以看出，實驗方面（占68%）的比重遠大於理論方面。

掌握基本資料的重要性

反例：2016年物理學史研習會某講者關於愛因斯坦遲未獲諾貝爾獎的發言

本人於2016年10月31日致劉源俊教授電郵：

.....另外，XXX提到的關於愛因斯坦獲得諾貝爾獎的故事應該是捏造的！他提到的那個人是Paul Painlevé，他是法國數學家，不可能是諾貝爾委員會的主席！此案較複雜，我已查到相關資料，待有空時整理後再寄上。

關於愛因斯坦與諾貝爾獎此一公案可參見：

復旦大學物理系教授施郁的文章「[愛因斯坦的奇葩諾貝爾獎](http://blog.sciencenet.cn/home.php?mod=space&uid=4395&do=blog&id=1079640)」
<http://blog.sciencenet.cn/home.php?mod=space&uid=4395&do=blog&id=1079640>

物理學史與諾貝爾物理獎相關書籍

《物理學史》，郭奕玲、沈慧君著，五南（2017年）。

第13章 諾貝爾物理學獎

第15章 單位、單位制與基本常數簡史

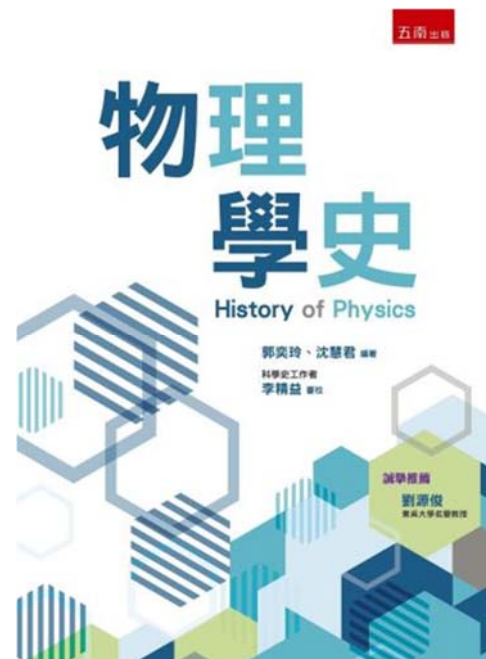
《科學的榮耀—諾貝爾物理學獎百年回顧》

郭奕玲、沈慧君著，科技圖書（2002年11月）。

「諾貝爾獎百年鑑」叢書台灣版物理部分：

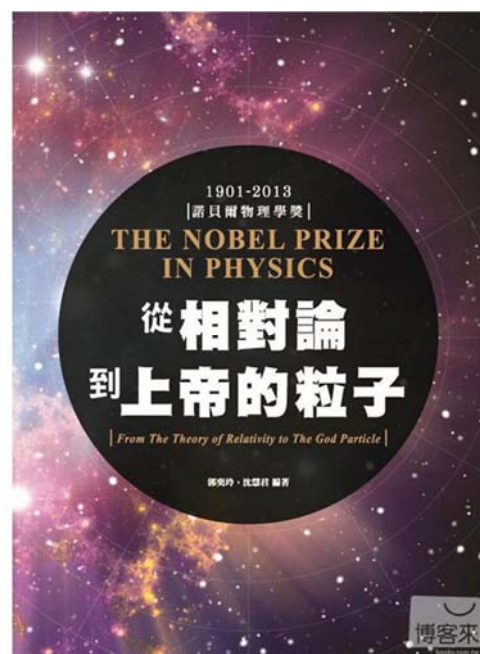
《精益求精—測量技術與精密計量》未刊稿

《科學月刊》每年十二月號專欄



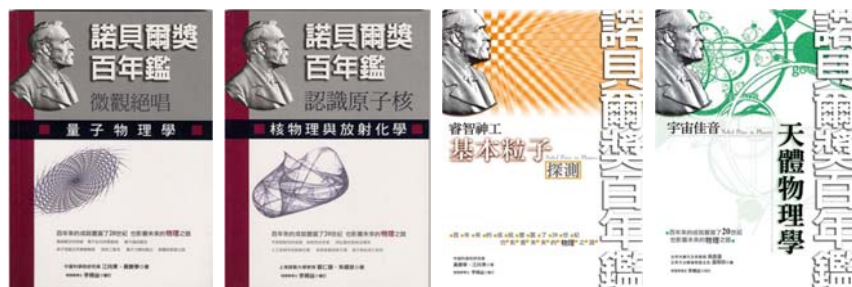
《科學的榮耀—諾貝爾物理學獎百年回顧》

（科技圖書，2002年11月。）



「諾貝爾獎百年鑑」叢書物理部分十冊：

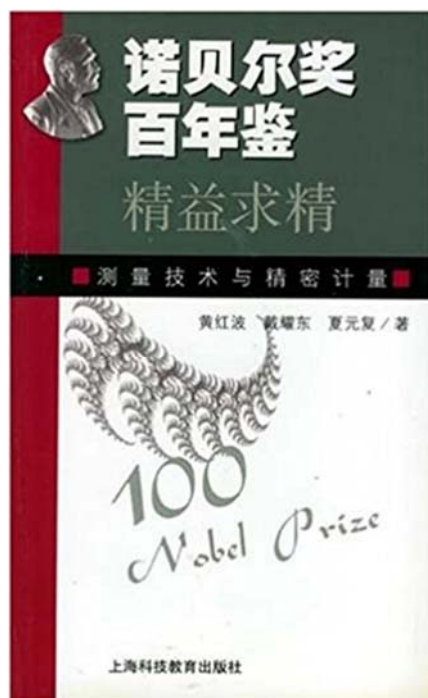
《微觀絕唱—量子物理學》、《認識原子核—核物理與放射化學》、《觀微探幽—X射線與顯微術》、《追尋自然之律—20世紀物理學革命》、《發明之源—物理學與技術》、《絕對零度的奇蹟—超導超流與相變》、《睿智神工—基本粒子探測》、《探索物質最深處—場論與粒子物理》、《宇宙佳音—天體物理學》、《無所不在的磁—粒子磁矩與固體磁性》。



1991年諾貝爾物理獎得主德熱納
(Pierre-Gilles de Gennes)



第9章 化學動力學的新進展
第2節 交叉分子束方法



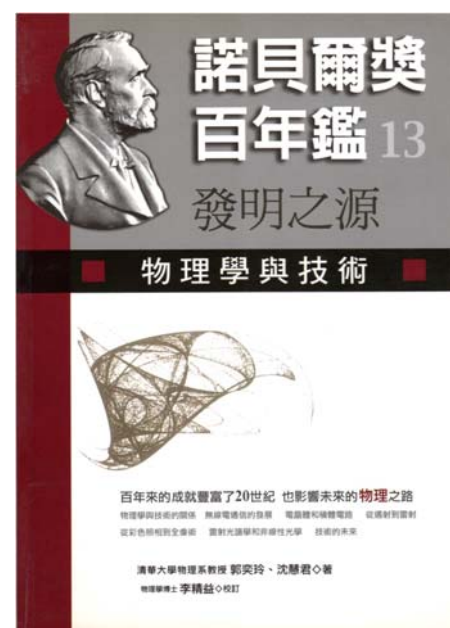
《無所不在的磁》校訂者序

本書交稿後，筆者所承擔的「諾貝爾獎百年鑑」叢書之物理部分的審(校)稿工作就只剩下《精益求精—測量技術與精密計量》卷了。...本叢書的出版計劃終於快接近完成。筆者在此唯有誠摯希望這一套叢書能得到台灣各界更多的關注，如此方能讓其發揮更大的作用。

李精益
乙酉春分於高雄望月陋室
穀雨改定



此叢書能為有心人提供一套確實可「增進功力」的科普讀物！



《諾貝爾獎百年鑑》各書內容除對相關領域的得主生平及其學術成就做出全面完整的綜述，還具有相當高的「預見性」，如：

《睿智神工—基本粒子探測》第9章「猜測可能獲獎的項目」提到

頂夸克的發現

探索希格斯粒子 2013年諾貝爾物理獎

微中子質量的探測

2002年諾貝爾物理獎一半 Raymond Davis、小柴昌俊

2015年諾貝爾物理獎 梶田隆章、A. B. McDonald

測量和計量

觀測和實驗是人類所有科學知識的來源，物理學自不例外。早在伽利略時代，人們已經認識到「物理學首先是一門實驗科學」。物理實驗是自然科學中最精確的。

在過去的一百多年，物理學發展迅速，其主要特徵有四：一是向著越來越小的尺度，二是向著越來越大的尺度，三是向著「快」的方向，四是向著「深入」的方向。這些探索無不需要進行精密的物理實驗或觀測，需要對物理量的精確測量和對時間、長度等基本量的準確計量，亦即它們都以測量和計量為基礎。

測量和計量可以說是物理學的基礎

《精益求精—測量技術與精密計量》書中依獲得諾貝爾物理獎的先後順序介紹了：

1907年得主邁克生及其成就；1920年得主紀姆堯及其成就；1930年得主拉曼及其成就；1961年得主穆斯堡爾及其成就；1966年得主卡斯特勒及其成就；1989年得主拉姆齊、德墨爾特和保羅及其成就；1994年得主布羅克豪斯和沙爾及其成就；1997年得主朱棣文、科恩-塔諾季和菲利普斯及其成就。

以下主要按年份同時參考學門領域逐一介紹，並增加2000年後相關獎項，另從《發明之源—物理學與技術》和《無所不在的磁—粒子磁矩與固體磁性》補入資料以較完整呈現歷史發展脈絡。

1907年諾貝爾物理獎

邁克生（Albert Abraham Michelson，1852—1931；邁克耳孫）因為「他的精密光學儀器，以及藉助它們所做的光譜學和計量學研究」（for his optical precision instruments and the spectroscopic and metrological investigations carried out with their aid）而成為美國第一位諾貝爾科學獎得主。



美國第一位諾貝爾獎得主是老羅斯福（Theodore Roosevelt），於1906年獲和平獎。

A.A. Michelson

1873年，畢業於美國海軍官校。

1875至1879年，擔任該校物理學和化學講師。

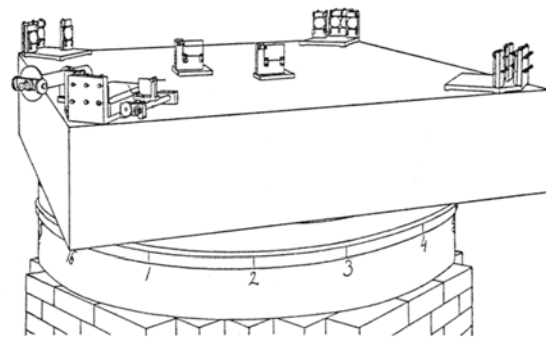
1878年7月，完成菲佐、傅科、科爾尼（M. A. Cornu）後的第四次地面光速測量。

1880年9月赴歐洲，先後跟隨亥姆霍茲、Quincke、科爾尼、E. Mascart和李普曼（1906年諾貝爾物理獎得主）學習。

1881年，發明邁克生干涉儀並以之進行檢測「以太風」的實驗，但得到「零結果」。



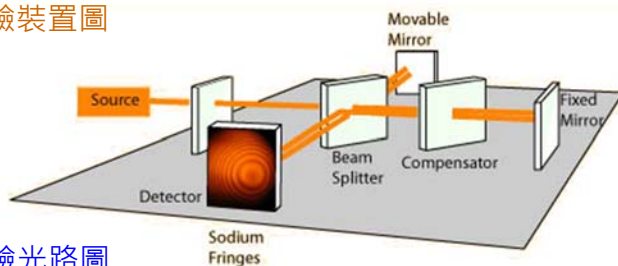
邁克生在 1881 年實驗中使用的干涉儀複製品



邁克生-莫立實驗裝置圖

有人說：
沒有邁克生干涉儀，
就沒有現代物理學
和天文學！

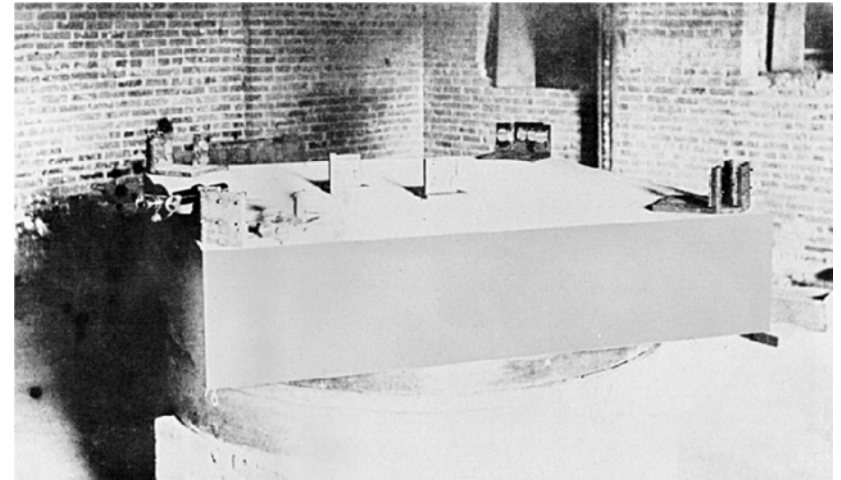
【問題】
愛因斯坦1905年提出
相對論時是否知道邁
克生-莫立實驗？



邁克生-莫立實驗光路圖

1885年與莫立（E. W. Morley）合作，次年再確證菲涅耳的以太部分曳引假說。

1887年，進行著名的邁克生-莫立實驗。



邁克生-莫立實驗裝置現場照片

1920年諾貝爾物理獎

紀堯姆（Charles Édouard Guillaume，1861–1938）「由於他發現鎳鋼合金的反常特性對物理學上精密計量所作的貢獻」（[for] the service he has rendered to precision measurements in Physics by his discovery of anomalies in nickel steel alloys）而獲獎。

1883年到國際計量局（BIPM）任局長助理，1902年起任副局長，1915年任局長，直至1936年退休。

他在BIPM最初研究測溫學。1889年出席第一屆計量大會。他的工作標誌著近代計量學的開始。



1930年諾貝爾物理獎

紀堯姆於1890年開始研究金屬合金。他曾系統研究鐵鎳合金，於1896年發現**因瓦合金**（亦稱**殷鋼**；invar，係invariation [不變]的縮寫），再於1919年發現**埃林瓦合金**（elinvar，係elasticity invariable [彈性不變]的縮寫）。

因瓦合金是一種鐵鎳合金，成分為鎳36%，鐵63.8%，碳0.2%，它的熱膨脹係數極低，能在很寬的溫度範圍內保持固定長度。**埃林瓦合金**是一種鐵鎳鉻合金，成分為鎳33~35%，鐵53~61%，鉻4~5%，鎢1~3%，錳0.5~2%，矽0.5~2%，碳0.5~2%；它在相當寬的溫度範圍內熱彈性係數實際上為零（即楊氏模量不變），熱膨脹係數也很低。

因瓦合金和**埃林瓦合金**具有廣泛的用途，但**因瓦效應**的物理本質至今未徹底解決。

新材料與新技術的發展密切相關

拉曼（Chandrasekhara Raman，1888—1970）因為「他對光散射的研究，以及發現以他命名的效應」（for his work on the scattering of light and for the discovery of the effect named after him）獲獎。

拉曼散射

拉曼是亞洲第一位諾貝爾科學獎得主；亞洲第一位諾貝爾獎得主是泰戈爾，於1913年獲得文學獎。



拉曼簡要生平

16歲大學畢業，以第一名獲物理學金質獎章。19歲獲物理碩士。當時的印度若無英國博士學位，就沒有資格在學術文化界任職，但會計行業例外。於是拉曼在短期自習後以第一名的優異成績獲得**總會計助理**的職務。當時的加爾各答在科學研究方面還相當落後，但有一所民間科研機構—**印度科學教育協會**，拉曼在此從事業餘科學研究。

1917年，**加爾各答大學**破例邀請拉曼擔任物理學教授。

1921年，拉曼代表學校出席在英國牛津舉行的不列顛大學年會。返程取道地中海，蔚藍的海水深深震動了他的心靈，使他對海水為什麼是藍色產生了強烈的興趣。在深入研究後，拉曼得出結論：海水的顏色並非由天空顏色引起，而是海水本身的一種性質！

1923年，拉曼的學生**Ramanathan**第一次觀察到光散射中顏色改變的現象。拉曼及助手深入研究後證明：這種波長變化的現象是一種特殊的二次輻射，且是普遍的效應。

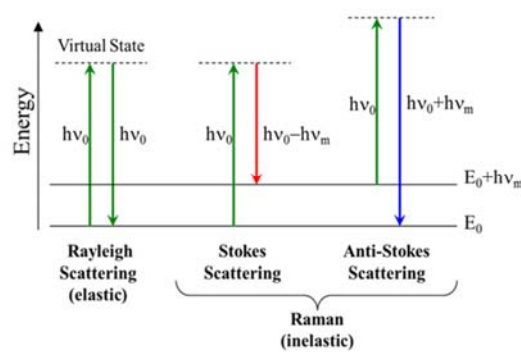
1924年，拉曼應邀赴加州理工學院講學，期間與康普頓過從甚密。**拉曼**從康普頓剛發現的X射線散射後波長變長的效應（**康普頓效應**）得到重要啟示，將自己的發現看成是「**康普頓效應的光學對應**」。回國後，拉曼與學生繼續窮究光散射現象，到1928年初終於獲致明確結論：顏色有所改變、比較弱又帶偏振性的散射光是一種普遍存在的現象，並將這種散射稱為**變散射**（modified scattering）。

拉曼將成果公開後，此發現很快被稱為**拉曼效應**，而把效應產生的新譜線稱為**拉曼光譜**。

拉曼宣布其發現幾個月後，蘇聯的G. S. Landsberg和L. I. Mandelstam在研究石英的散射中也觀察到這一效應，並稱之為**聯合散射**。

拉曼散射是研究分子結構的重要方法，利用它可以確定多原子分子（特別是有機化合物）的固有頻率。

拉曼光譜使得在可見光區研究分子的振動和轉動等狀態成為可能，因此拉曼光譜成為紅外吸收分子光譜的補充。



拉曼散射中的量子能階關係

拉曼效應被稱為「（20世紀）20年代實驗物理中最卓越的三、四個發現之一」。拉曼效應是繼康普頓效應之後，又一個光量子理論的有利實驗證據。

雷射光源為拉曼散射的研究創造了空前有利的條件

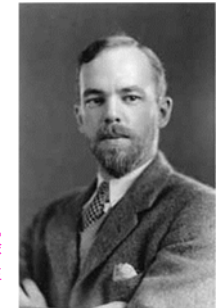
1966年諾貝爾物理獎

卡斯特勒（Alfred Kastler，1902—1984）因為「發現和發展了研究原子中赫茲共振的光學方法」（for the discovery and development of optical methods for studying Hertzian resonances in atoms）獲獎。



光磁共振、光抽運技術

被尊稱為「雷射（激光）之父」



與諾貝爾獎擦身而過的比特

卡斯特勒簡要生平

1920年，入巴黎高等師範學校。其量子力學教授Eugene Bloch對他的發展起了深刻的影響。在閱讀索末菲的名著《原子結構與光譜線》的過程中，對電磁輻射和原子交互作用中的角動量守恆特別感興趣。

1931~1936年，任波爾多大學實驗助手，期間系統研究了光散射和螢光過程中角動量守恆的普適性。

1941年，回高等師範學校，負責實驗室工作。卡斯特勒與當時許多物理學者都有聯繫，其一是對他的「光抽運」技術研發具啟明作用的MIT教授比特（F. Bitter）。比特於1949年提出將射頻技術應用到原子激發態的研究中實現光抽運的設想，但拉比和拉姆齊指出其論文中有一基本錯誤。

某次會議，比特向卡斯特勒提及光抽運想法，引起他的興趣。卡斯特勒認為只要將原案適當修改，就有可能實現光抽運方法，立即著手設計實驗方案，並派學生布羅塞爾（Jean Brossel）到比特的實驗室，很快完成射頻條件下的磁共振。卡斯特勒善用應用已有成果，在實驗裝置中加上光學共振部分，因而被稱為光磁共振方法。1954年，布羅塞爾回到法國，此時卡斯特勒又有了新想法：將光磁共振方法擴展到基態研究中！

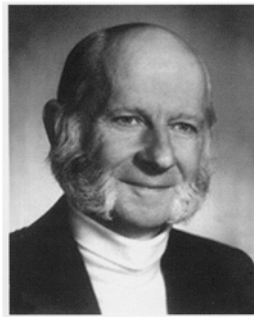
在設計光磁共振實驗的一開始，卡斯特勒就抱定「原子的輻射過程中角動量守恆」的信念。選擇最簡單的實驗對象是卡斯特勒設計實驗時的一貫作風。經過反覆多次的實驗，卡斯特勒與布羅塞爾終於在1955年取得成功，觀察到明顯的光抽運現象；接著，又將光抽運與光磁共振方法結合在一起。

1989年諾貝爾物理獎

一半授予**拉姆齊**，以表彰他「發明了分離振盪場方法及用之於氫微波激射器和其他**原子鐘**」；另一半授予**德墨爾特**和**保羅**，以表彰他們「發展了**離子阱技術**」。



N. F. Ramsey
1915–2011

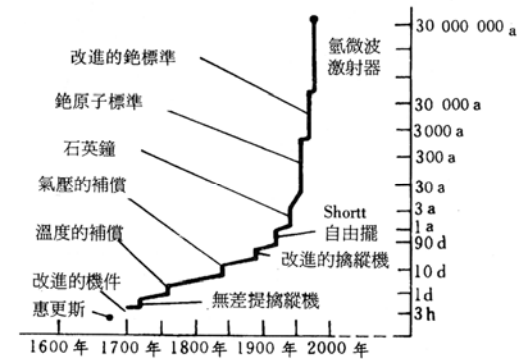


H. G. Dehmelt
1922–2017



Wolfgang Paul
1913–1993

對精密計時的追求



時鐘的改進

圖中右端標出各種時鐘快慢1秒所經過的時間（a、d、h分別表示年、日、小時）

說到**原子頻率標準**，就得提到**拉比**和他的**分子束核磁共振**方法。拉比於1940年提出可利用鈹-133的超精細結構作為頻率測量的基準。

二戰期間，**拉姆齊**參與**雷達**研製，此經歷對他後來研發**原子鐘**助益甚大。

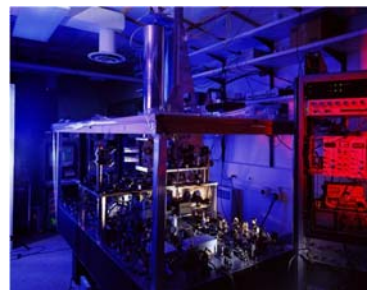
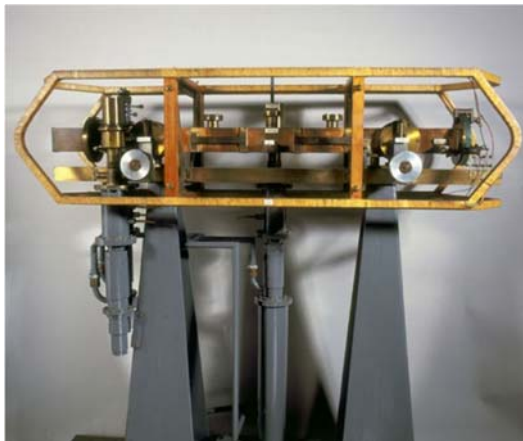
1949年，拉姆齊提出**分離震盪場方法**。

1949年，美國國家標準局（簡稱NBS）使用氫分子作為磁振源製成了**世界上首台原子鐘**。

1952年，NBS應用分離震盪場方法製成**第一台鈹原子鐘**。

1955年，英國國家物理實驗室建成第一台作為校準源的鈹原子鐘。

1960年，拉姆齊等人製成第一台**氫原子鐘**。



NIST-F1 鈹噴泉原子鐘

英國國家物理實驗室的第一台鈹原子鐘

二戰期間發展起來的**微波技術**為分子束方法打開了新的局面，人們用一棵樹來形容**分子束**方法的發展，稱之為「**拉比樹**」（Rabi Tree）。這棵樹可以說是由**實驗原子物理學的奠基者斯特恩**「栽種」、由拉比「培育」，並在二十世紀後半葉結出了豐碩的果實。

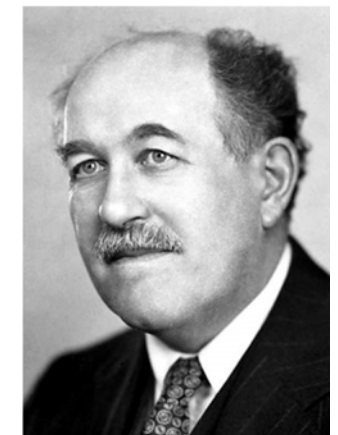
1943年諾貝爾物理獎

授予**斯特恩**（Otto Stern，1888–1969），以表彰「他在發展分子束方法上所作的貢獻和發現質子的磁矩」。

參考資料：

《科學的榮耀》1943年部分

《無所不在的磁》第3章



Students, Assistants and “post-docs” of Stern who went on to win Nobel Prizes:

Isidore Rabi, 1944,

Felix Bloch, 1952

Polykarp Kusch, 1955,

Emilio Segre, 1959

Norman Ramsey, 1989

The Number of times Stern was nominated for Nobel Prize:81

He has been justly called:

“The Founding Father of experimental atomic physics”

1944年諾貝爾物理獎

授予**拉比**（Isidor Isaac Rabi, 1898–1988），以表彰「他用共振方法記錄原子核的磁屬性」（for his resonance method for recording the magnetic properties of atomic nuclei）。



1928至1929年赴歐洲，先後在**索末菲**、**Bohr**、**施特恩**、**海森伯**和**Pauli**等人指導下學習；在**施特恩**處學習**分子束技術**和**質子磁矩**測量對他後來在原子核磁性等方面的研究助益甚大。二次期間主持雷達研製工作。

參考資料：

《科學的榮耀》1944年部分

《無所不在的磁》第4章。

二十世紀後半葉與「拉比樹」相關的諾貝爾物理獎：

1952年獎授予**布洛赫**（Felix Bloch）和**帕塞爾**（Edward Mills Purcell）以表彰他們關於**核磁共振**的研究成果

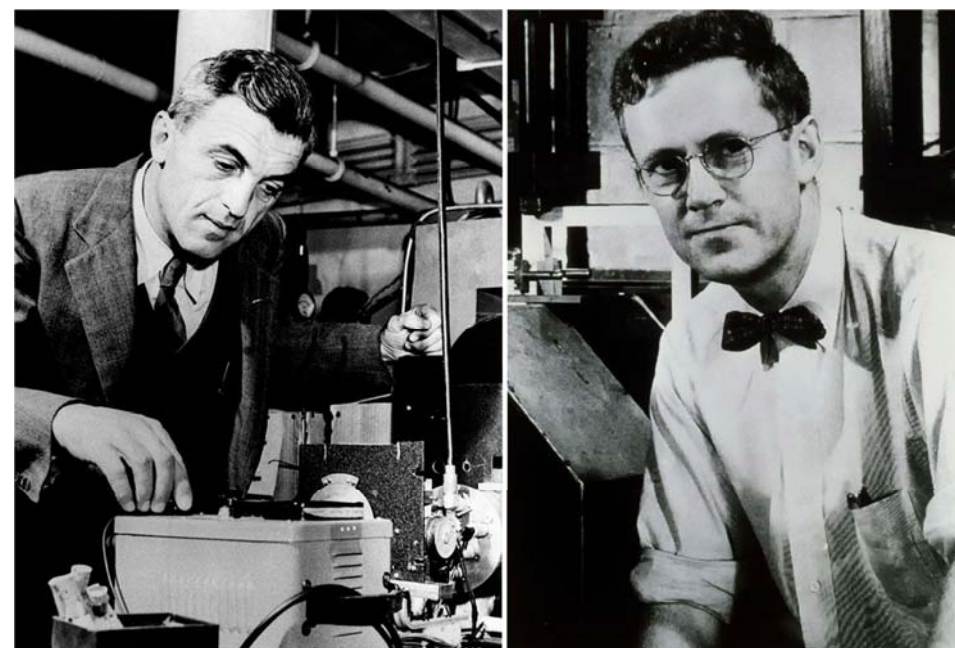
1955年獎，一半授予**蘭姆**（Willis [Eugene] Lamb [Jr.]）因他發現**蘭姆移位**（Lamb shift），一半授予**庫什**（Polykarp Kusch）因他發現**電子反常磁矩**。

1964年獎，一半授予**湯斯**（Charles Hard Townes）以表彰他關於**微波激射器**（maser，邁射）和**雷射**的工作

1966年獎授予**卡斯特勒**

1981年獎一半授予**布洛姆伯根**（Nicolaas Bloembergen）和**肖洛**（Arthur Schawlow）以表彰他們對**雷射光譜學**的貢獻

1989年獎，一半授予**拉姆齊**



布洛赫（左）和帕塞爾

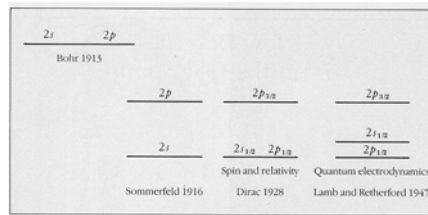


蘭姆

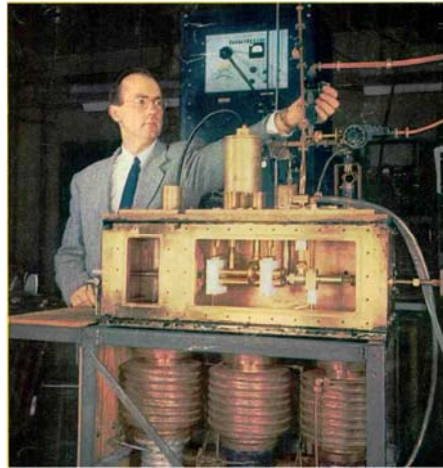


庫什

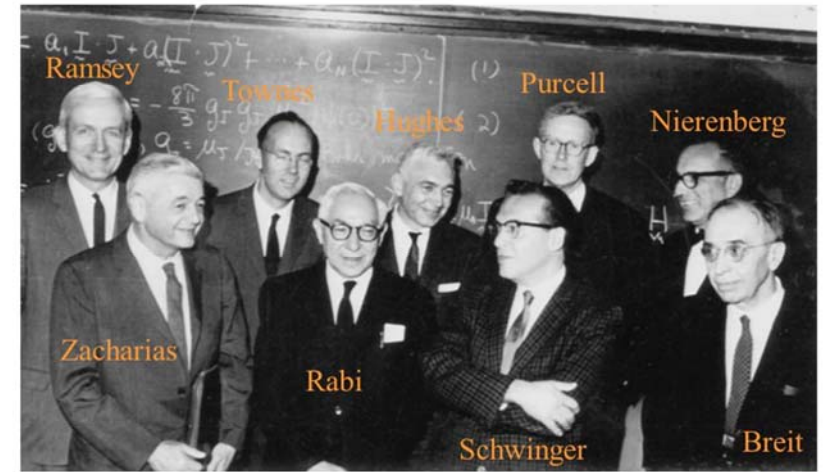
氫原子能階



湯斯在調整第一台微波激射器



Rabi and disciples 1967-from V.Hughes



Rabi was also instrumental in creating both BNL and CERN



BROOKHAVEN
NATIONAL LABORATORY

Space Quantization-to-MRI



M. J. Tannenbaum 11/22

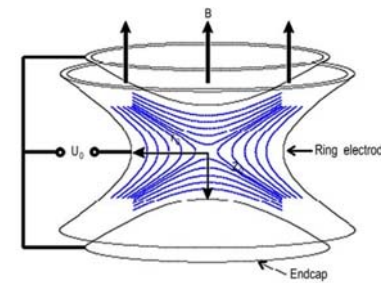
捕獲粒子的人

1989年諾貝爾物理獎的一半授予德墨爾特和保羅，以表彰他們「發展了離子阱技術」。

保羅15歲時喪父，心靈受創，好在父親生前好友索末菲對其產生正面影響。後當學徒，深通精密機械工藝。1951年，設計出由六個磁極構成的聚焦磁場，後又設計出一種射頻四極電場，能將帶電粒子囚禁在電場中，形成了一個離子阱。

離子阱的概念是1936年由彭寧（F. M. Penning, 1894–1953）提出的，其設計後稱彭寧阱。1958年，保羅對彭寧阱做出重大改進。在靜電場和動態電磁震盪場的作用下，帶電粒子能穩定地為「阱」所俘獲，此一裝置後人稱為保羅阱。

美國JPL的科研人員首先將保羅阱應用於原子鐘上。



彭寧阱示意圖



被俘限在保羅阱中的粒子

德默爾特出生於德國，二戰後入哥廷根大學學習。1955年赴美，任教於西雅圖華盛頓大學。1960年代末起，德默爾特進一步發展了離子阱技術和精密測量方法，在離子阱中首次觀察到單個電子，實現了單電子冷卻。1975年，德默爾特等人將雷射冷卻技術運用到離子俘獲原子鐘上，大幅提高原子鐘的精密度。

1958年，德默爾特首先提出地球素（geonium）的實驗方法。

被測得最精確的量

如果說鉀原子鐘為科學的發展提供了精確的計量標準，將測量的精確程度推到前所未有水平，那麼地球素實驗方法對電子g因子 (g_e) 的測量則將精確測量技術推到了極致，為探索微觀粒子開闢了一條新途徑，也推動了對量子電動力學的檢驗。地球素實驗方法實際上就是採用離子阱方法囚禁和研究單電子或其他帶電粒子的實驗方法。

1984年，德默爾特小組測量結果： $g_e = 2.002319304386(8)$

地球素實驗不但可以測量電子的參數，也可以測量正[電]子的參數。1986年成果： $m_p/m_e = 1836.152701(37)$

1987年成果： $g(e^-)/g(e^+) = 1.00000000000005(60)$

這是對CPT定理最嚴格的檢驗。

離子阱方法還可以大大改善微波和雷射光譜學實驗

1997年諾貝爾物理獎

均分給朱棣文、科恩-塔諾季、菲利普斯，以表彰他們「發展了用雷射冷卻和捕獲原子的方法」。



朱棣文(Steven Chu)
1948–



Cohen-Tannoudji
1933–



W. D. Phillips
1948–

1975年，亨施 (Hänsch) 和肖洛 (Schawlow) 首先提出相向傳播的雷射光束可以使自由原子冷卻，而維尼蘭德 (Wineland) 和德默爾特則幾乎同時對離子阱中的離子也提出類似建議，其物理原理都基於多普勒效應。

1985年 朱棣文小組實現雷射多普勒冷卻
光學黏團 光學鑷子

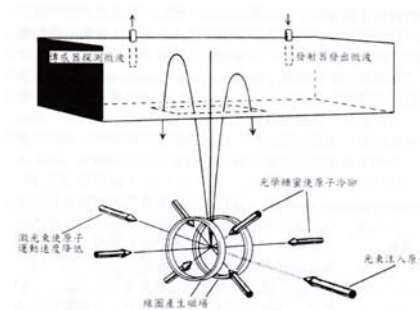
1988年 菲利普斯小組克服多普勒冷卻極限
偏振梯度冷卻 (薛西佛斯冷卻)

科恩-塔諾季小組克服反衝冷卻極限

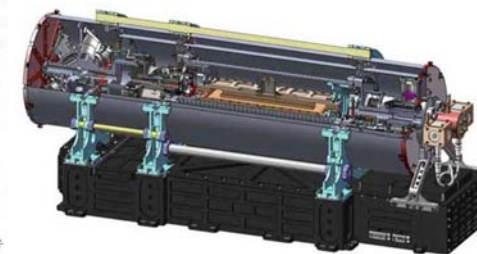
原子干涉儀 可使重力加速度 g 的測量精度達到 10^{-10} 量級

原子噴泉 原子激射

玻色-愛因斯坦凝聚 2001年諾貝爾物理獎



原子噴泉示意圖



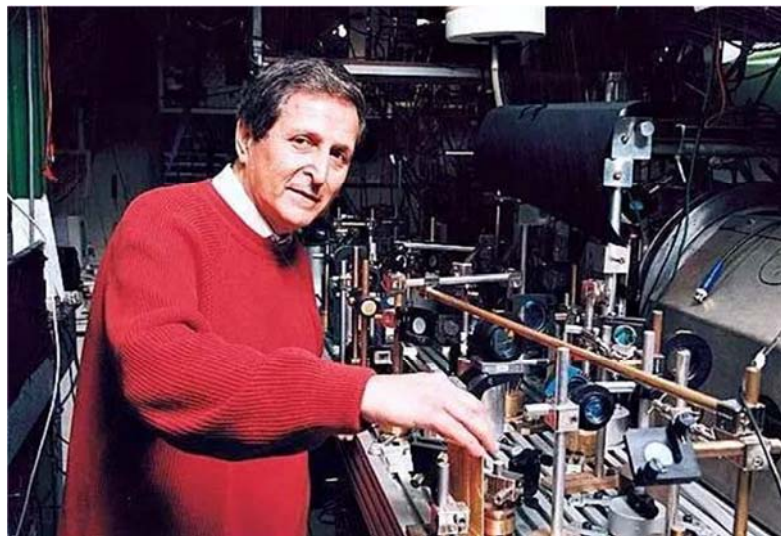
中國科學院上海光機所製造的
搭載於天宮二號上的冷原子鐘

采桑子·激光冷却捕获原子 李颖业

内能涌动原子躁，踪迹惚恍。稟性疏狂，欲睹真容谁破窗？
欣闻妙计炎黄献，六束激光。却步含霜，困在磁笼敛素妆。

詞說科學博客首頁 <http://blog.sciencenet.cn/home.php?mod=space&uid=449537>

科恩-塔諾季出生於時屬法國的阿爾及利亞，1953年赴法，就讀於**巴黎高等師範學校**，在**卡司特勒**的指導下於1962年獲巴黎大學博士。1973年起任法蘭西學院教授。



2005年諾貝爾物理獎

一半授予格勞伯以表彰他對「對**光學相干性**的量子理論的貢獻」；另一半授予**霍爾**和**亨施**以表彰他們「對包括**光[學]頻[率]梳**（optical frequency comb）技術在內的，基於雷射的**精密光譜學**發展作出的貢獻」。



Roy Jay Glauber
1925–



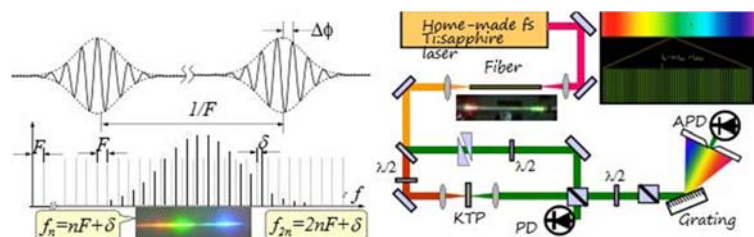
John Lewis Hall
1934–



Theodor W. Hänsch
1941–

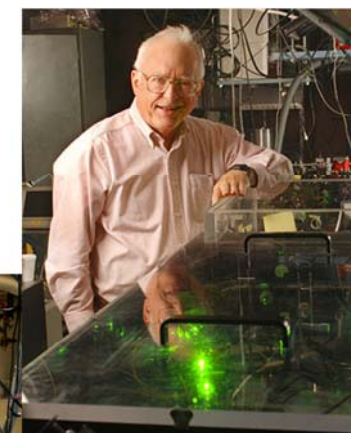
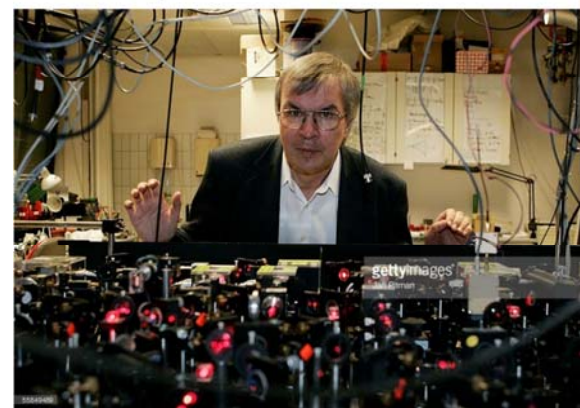
霍爾和亨施利用雷射光的**同調性**，進行各類高精密基礎物理的研究。他們在1999-2000年發明**飛秒光頻梳雷射**，使得「**光鐘**」成為可能。

亨施於1968年獲海德堡大學博士後不久，赴史丹佛大學任教，加入肖洛領導的雷射光譜學中心；在兩人領導下該團隊於1970年代在**雷射光譜學**上作出許多貢獻。**亨施的學生魏曼（Carl E. Wieman）**是2001年諾貝爾物理獎得主之一。



利用**飛秒**雷射實現光梳的原理（左）及相關的光路圖

John (Jan) L. Hall
雷射穩頻第一高手
Theodor (Ted) W. Hänsch
氫原子光譜第一高手
They are Good friends!



2012年諾貝爾物理獎

授予阿羅什和維尼蘭德以表彰他們「發展出能夠量測和操控單個量子系統的開創性實驗方法」(for ground-breaking experimental methods that enable measuring & manipulation of individual quantum systems)。



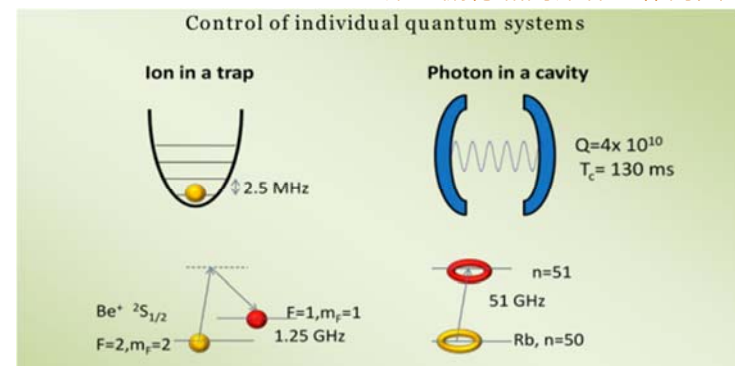
Serge Haroche
1944–



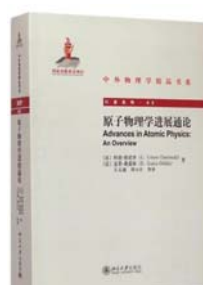
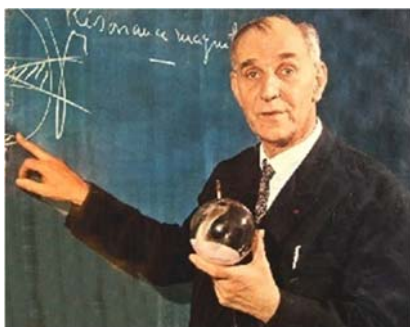
David Jeffrey
Wineland
1944–

阿羅什本科畢業於巴黎高等師範學校，從巴黎第六大學獲博士，其導師為科恩-塔諾季。科恩-塔諾季於1997年因研究利用光子操控原子（雷射冷卻）而獲獎，阿羅什則因發展原子操控光子的實驗技術並將其應用在量子態的控制與量測上，而於2012年獲獎。維尼蘭德於1970年獲哈佛大學博士，導師為拉姆齊；之後至西雅圖華盛頓大學，在德默爾特指導下從事研究。維尼蘭德的研究關於利用雷射光操控被囚禁在離子阱中的離子。

維尼蘭德和阿羅什工作的共性



師徒三代諾貝爾物理獎得主



科恩-塔諾季的名著：

《量子力学》
《原子物理学
进展通论》

1981年諾貝爾物理獎

一半*授予布洛姆伯根 (N. Bloembergen, 1920–2017) 和肖洛 (A. L. Schawlow, 1921–1999) 以表彰「他們對發展雷射光譜學的貢獻」。

*另一半授予Kai M. Siegbahn (1918–2007) 以表彰「他對發展高解析度電子能譜學的貢獻」



布洛姆伯根



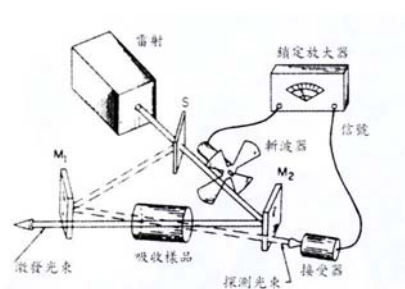
肖洛



布洛姆伯根及其學派發展出一系列非線性光譜學方法

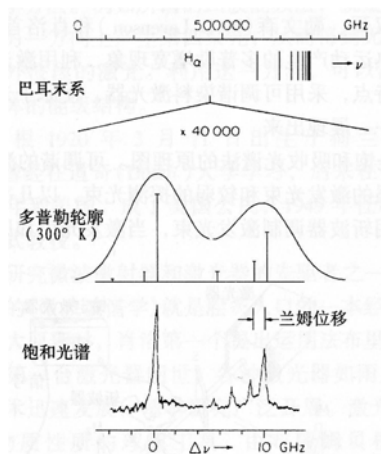
尚洛是微波激射器和雷射的先驅之一

尚洛研究組在1970年代為**高分辨率雷射光譜**方法作出重大貢獻，創造了多種新方法，如**飽和吸收光譜法**。



飽和吸收光譜法的原理圖

用飽和吸收光譜法
測出的氫譜線H_α

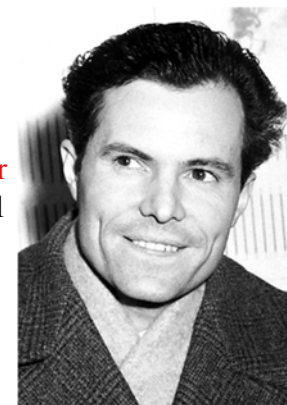


1961年諾貝爾物理獎

一半*授予**穆斯堡爾**以表彰他「對 γ 輻射的共振吸收的研究和發現與此聯繫的以他命名的效應」(for his researches concerning the resonance absorption of gamma radiation and his discovery in this connection of the effect which bears his name)。

穆斯堡爾效應

R. L. **Mössbauer**
1929–2011



*另一半授予霍夫斯塔特 (Robert Hofstadter, 1915–1990) 以表彰他關於核子結構的發現。

1957年，穆斯堡爾發現 γ 射線的**無反衝共振吸收**現象。

穆斯堡爾效應被重視主要原因有二：它是當前能量分辨本領最高的物理手段，它便於研究**超精細交互作用**。

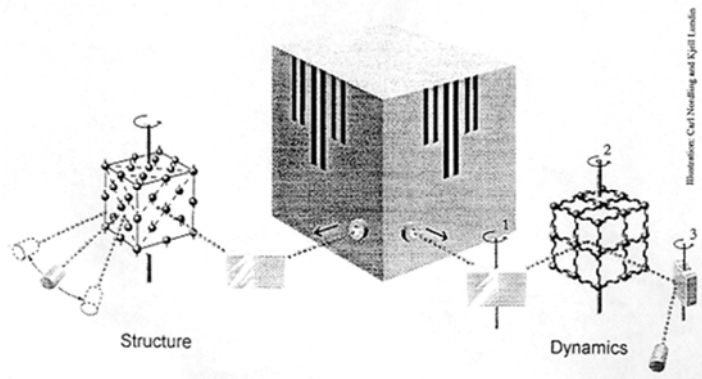
歷史上不少傑出的**科學發現**為本學科進行了開拓性工作，但也有一些則在**其他學科領域**得到**重要的廣泛應用**，從而產生深遠影響；**穆斯堡爾效應**屬於後者。穆斯堡爾效應獲獎二十餘年後，有人評述此一「20世紀物理學的里程碑實驗」時寫道：有些**新發現**的效應在短暫地令人激動後很快就失去了它的魅力。可是另外一些卻能長期保持其魅力，並且即使當它們成熟時仍然有著**不可估量的前景**。**穆斯堡爾效應**就屬於後一種。有人回顧迄1999年，此效應帶來的重大進展有：用它第一次驗證了**引力紅移**，解決大分子晶體的相位問題，首次正確測得鐵磁材料中的內磁場，首次觀察和正確描述原子核和核外環境間的超精細交互作用...

1994年諾貝爾物理獎

頒給「對用於凝聚體物質研究的**中子散射技術**的開創性研究」，一半授予布羅克豪斯 (Bertram Neville Brockhouse, 1918–2003；左下) 以表彰他「發展了**中子譜學**」，一半授予沙爾 (Clifford Glenwood Shull, 1915–2001) 以表彰他「發展了**中子繞射技術**」。



中子有雙大眼睛 相較於X射線，中子這雙大眼睛可以看得更深、更細，分得更清，還可以看到磁結構。沙爾找到中子的第一隻眼睛，它可以看到「原子在哪裏」；布羅克豪斯找到中子的第二隻眼睛，它可以探明「原子在做什麼」。



中子繞射儀和三軸譜儀示意圖：（左）用於研究物質結構的中子繞射儀，（右）用於研究物質動態特性的三軸譜儀

1973年諾貝爾物理獎

一半授予約瑟夫森（Brian Josephson，1940— ）以表彰「他對穿過隧道勢壘的超導電流所作的理論預言，特別是普遍被稱為約瑟夫森效應的那些現象。」

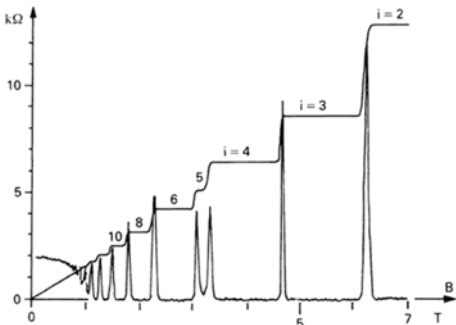


1962年，在劍橋大學當研究生時作出理論預言。

*另一半授予江崎玲於奈和 Ivar Giaever 以表彰「他們分別在有關半導體和超導體中的穿隧現象的實驗發現。」

1985年諾貝爾物理獎

馮·克利青（Klaus von Klitzing，1943— ）因為「發現量子霍爾效應」獲獎。



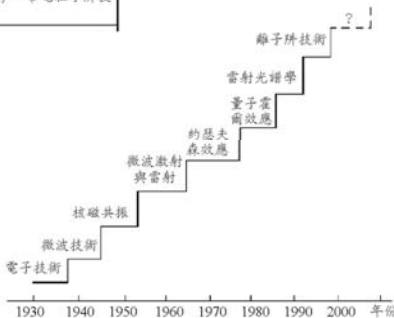
1980年發現的量子霍爾效應

約瑟夫森效應和量子霍爾效應對電磁計量的影響

年份	主持人	反映科學技術中的那些重大進步
1929	伯奇	光譜學、光速測定、油滴儀實驗
1941	伯奇	X射線繞射、電子技術
1947	杜蒙、科恩	微波
1955	科恩、杜蒙	核磁共振
1969	泰勒等	微波激射和雷射
1973	科恩、泰勒	約瑟夫森效應
1986	科恩、泰勒	雷射光譜學、量子霍爾效應
1998	莫爾、泰勒	雷射光譜學、量子電動力學、帶電粒子阱技術

歷年來的基本常數評定

基本物理常數隨著科學技術的進步不斷登上新臺階



歷史的啟示

《睿智神工》 和《探索物質最深處》審訂者序：

……《睿智神工—基本粒子探測》的15個獎項固均屬實驗工作，而《探索物質最深處—場論與粒子物理》則涉及7項理論工作及5項實驗工作，此情形清楚說明了**實驗在物理這門科學中的份量**。以此為鑑，**對亟亟欲借獲得諾貝爾獎來肯定自身科研水準的海峽兩岸，是否應在科學教育中更注重訓練健全的概念、啟發靈活的思路及培養手腦並用的能力（好的實驗工作絕非僅是「動手」之事！）呢？**

《發明之源—物理學與技術》校訂者序：

筆者...負責《諾貝爾獎百年鑑》台灣版物理部份各卷之審訂或校訂工作，自己對其進行過「加工」。此外，為充實篇幅，提高可讀性，尚**加入不少圖片**；其標準如下：

（一）**具歷史價值**；（二）**有助於瞭解物理知識**；

（三）**能培養讀者在物理上更寬廣而健全之素養**（如有些相當複雜之儀器裝置及實驗結果，自然不可能一看即懂，它們之所以出現無非是希望年輕學子深切認知**學物理絕不只是導公式、背題組而已**；**真正有用的科技知識是必須恰當掌握相關細節的**；**科學的進展往往來自於新儀器之發明**〔以人次論，百年來2/3以上的**諾貝爾物理獎項**頒給實驗工作，而其中有許多是得力於新儀器〕...）。

...筆者深切期望此叢書的出版能為有心人提供一套確實可「增進功力」的科普讀物！

諾貝爾獎之外的世界

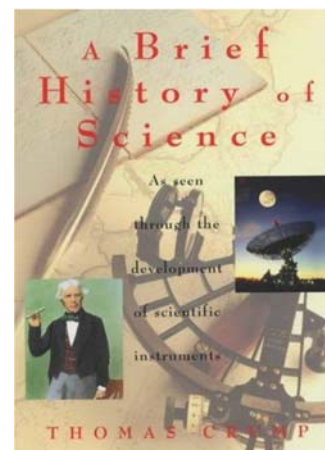


本书的意义不在于打破或巩固“诺尔贝奖”的神圣地位，而是希望帮助读者领略诺贝尔奖之外的那片广阔天地。

国际科学技术奖项自18世纪出现以来，伴随着科学技术的发展，一直在鼓励广大科学技术工作者、奖励优秀科学技术成果方面发挥着重要作用。国际科学技术奖项象征着科学共同体不分地域的对优秀科学家的认可，获得者可以说是科学界中的“明星”。遗憾的是，**诺贝尔奖以外的奖励世界，既缺乏关注，也缺乏研究。**

本書內容從人類開始了解火和它的許多用途，直到21世紀地下深處長度26公里的粒子加速器，這是對人類創新能力引人入勝的探究。作者描述了我們表現在**設計和製造工具及科學儀器**方面的的創造力如何不斷地擴展科學的領域，從而推進了人類的文明。

在試圖認識宇宙的過程中，我們發展了更為深奧精妙的手段。



古代的**日晷**在文藝復興時期的歐洲導致了以阿拉伯數字記錄下標準的測量結果。從1600年前後開始的現代科學，其標志穩步地改進通訊技術提高生活的舒適度和生存的可能性，繼之以**顯微鏡、溫度計、分光鏡、化學天平、真空泵和X射線、粒子計數器和加速器、半導體和微處理器**等，這些代表技術最高水平的科學儀器不斷發展。本書還描述了用來接近**絕對零度**並在此溫度下觀察物質的儀器和設備。

討論

精益求精

以下七張為附錄

科學史的重要性

從最近發生的事情談起

(一)中學教材中的錯誤

本張起
為附錄



作者簡介

陳大為老師，縱橫補教界
25年

陳大量老師，太陽教育團
隊高中物理首席教師

內容簡介

本書自物質分類開始，先探討物質與能量、純物質與混合物、元素與化合物等區別，再帶入原子結構主題，研究原子內部三大主要粒子「電子」、「質子」、「中子」與其他微粒子，最後以元素週期表為總結。附錄的「量子論」，是論述近代微粒子的研究，其中並有作者本身見解，希望能與讀者做思想上的交流，值得細細研究品味。

個人觀察

此書涉及物理部分有許多錯誤，特別是物理學史方面！

90頁

四、近代其他微粒子的發現*

1. 夸克 (quark)

(1) 1960年代，「夸克模型」(quark model)和「部分子模型」(parton model)等理論可用來解釋質子、中子、其他粒子及更小結構的問題。

(2) 早期的研究所提出的夸克模型只有兩種，一種是帶 $1/3$ 單位負基本電荷 $(-1/3)$ 的下夸克(down quark，簡寫成「d」)，另一種是帶 $2/3$ 單位正基本電荷 $(+2/3)$ 的上夸克(up quark，簡寫成「u」)。

a. 質子是帶 $+1$ 單位電荷，因為它是由兩個上夸克加上一個下夸克所組成的，合計是 $2 \times (2/3) + (-1/3) = +1$ 。P (質子) = (uud)

b. 中子是電中性，所以它的組合方式是兩個下夸克加上一個上夸克所組成的，合計是

$$2 \times (-1/3) + (2/3) = 0。N (中子) = (udd)$$

(3) 物理學家隨後發現有些粒子無法用以上兩個夸克的組合來解釋，之後陸續又發現了奇夸克(s)、魅夸克(c)、底夸克(b)和頂夸克(t)。

2. 輕子

(1) 電子：質量只有質子的 $1/1836$ 。

(2) 渺子(μ muon)：比電子重約207倍。

(3) 陶子(τ tauon)：比電子重約3484倍。



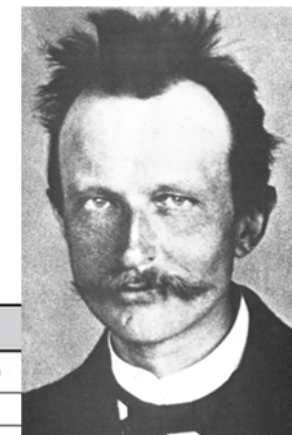
雖然這麼小的能量子，讓整體能量看起來幾乎是連續性的，但終究連續和不連續仍然屬於不同的探討空間，其中所包含的數學觀念更是完全不同。就只是這個小小的差異，普朗克利用能量子的概念重新統整了黑體輻射能量的統計，重新計算以能量量子化條件的黑體輻射強度分布，真的就跟實驗幾乎完全吻合，從普朗克計算出的分布函數，可以證實能量量子化的確是正確的。不過普量子論中的普朗克常數，在普朗克有生之年並沒有被測量出來，這讓普朗克非常的難過，甚至在他臨終時將普朗克常數 $h =$ 刻在自己的墓碑上，不過 h 等號後面是空白的，他希望未來有人測量出來之後能把數字刻上去，結果沒多久愛因斯坦（Albert Einstein）在研究光電效應時測量出此常數。

Max Planck生平

1858年4月23日－1947年10月4日

1900年12月提出能量子觀念

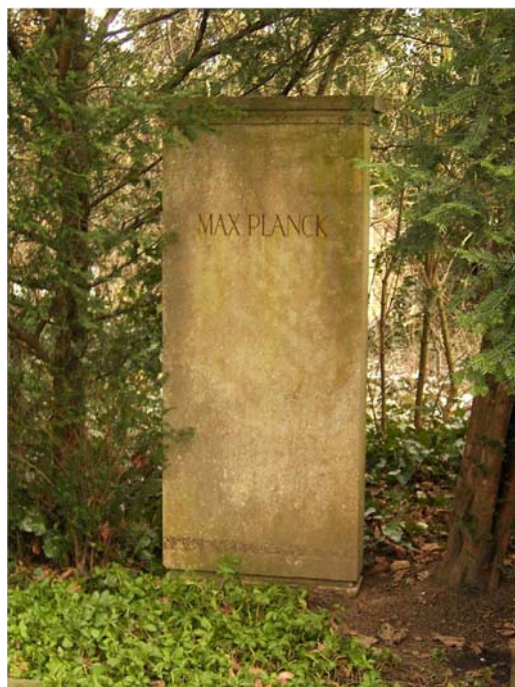
1905年愛因斯坦提出光子觀念



1901年時的Planck

歷年來Planck常數的測量結果

年份	工作者	方法	結果 (10^{-34} Js)	
1900	普朗克	黑体辐射	6.55	
1916	密立根	光电效应	6.547(6)	
1921	叶企孙等	X射线连续谱	6.556(9)	
1955		平差	6.625 17(23)	
1969		平差	6.626 196(50)	7.5×10^{-6}
1973		平差	6.626 176(36)	5.4×10^{-6}
1986		平差	6.626 075 5(40)	6.0×10^{-7}
1998		平差	6.626 068 76(52)	7.8×10^{-8}
2002		平差	6.626 069 3(11)	8.5×10^{-8}



Planck的墓碑

下方刻有Planck常數
 $h=6.62 \times 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$

<https://www.youtube.com/watch?v=qHPEHvRPkM4>

作者加入物理學史內容的用意？

資料來源？

台灣科學教育、特別是科學師資培育學程中的問題？

封面圖案說明

封面圖案由四十四位重要物理學家的圖片或相片依成就的大致先後順序組圖而成，他們是：

第一列：Galileo **Galilei**, Robert **Hooke**, Isaac **Newton**, Christiaan **Huygens**, Daniel **Bernoulli**, Joseph-Louis **Lagrange**, Charles-Augustin **de Coulomb**, Alessandro **Volta**, James Prescott **Joule**, Thomas **Young**, Augustin-Jean **Fresnel**, Nicolas Léonard Sadi **Carnot**, Michael **Faraday**, Rudolf Julius Emanuel **Clausius**.

第二列：James Clerk **Maxwell**, Ludwig Eduard **Boltzmann**, William Rowan **Hamilton**, William Thomson (Lord **Kelvin**), Hendrik Antoon **Lorentz**, John William Strutt (Lord **Rayleigh**), Max **Planck**, Josiah Willard **Gibbs**, Albert **Einstein**, Ernest **Rutherford**, Heike Kamerlingh **Onnes**, Niels **Bohr**, Louis **de Broglie**, Max **Born**, Werner **Heisenberg**.

第三列：Erwin **Schrödinger**, Wolfgang **Pauli**, Paul **Dirac**, Enrico **Fermi**, 湯川秀樹 (**Hideki Yukawa**), Lev **Landau**, 朝永振一郎 (**Sin-Itiro Tomonaga**), Julian **Schwinger**, Richard **Feynman**, John **Bardeen**, 楊振寧 (**Chen Ning Yang**), 李政道 (**Tsung Dao Lee**), 吳健雄 (**Chien Shiung Wu**), Murray **Gell-Mann**, Steven **Weinberg**.