

Μετρολογία, η Επιστήμη των Μετρήσεων



Χρήστος Μπαντής, *Ph.D.*

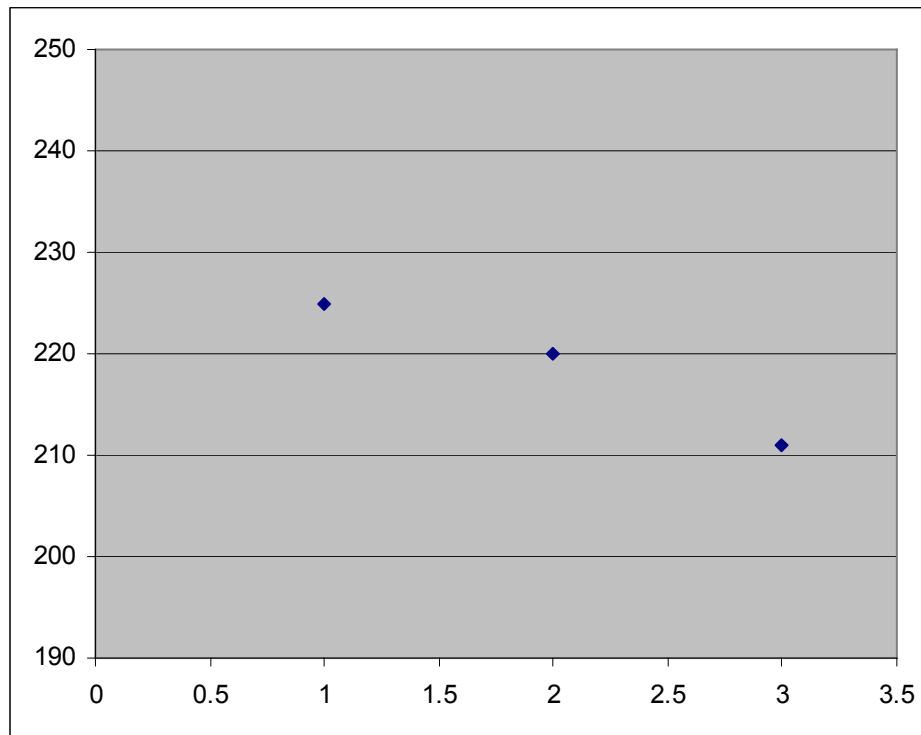
Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας

bandis@eim.gr

Μέτρηση ύψους



Στην προσπάθειά μας να μετρήσουμε το ύψος μια πόρτας αναφέρουμε τρία αποτελέσματα. Το πρώτο είναι μία εκτίμηση με το μάτι και τα άλλα δύο μετρήσεις με τη χρήση ενός χάρακα. Μετρήσεις που μας δυσκόλεψαν όμως λίγο γιατί δεν φτάναμε μέχρι το πάνω μέρος τις πόρτας.



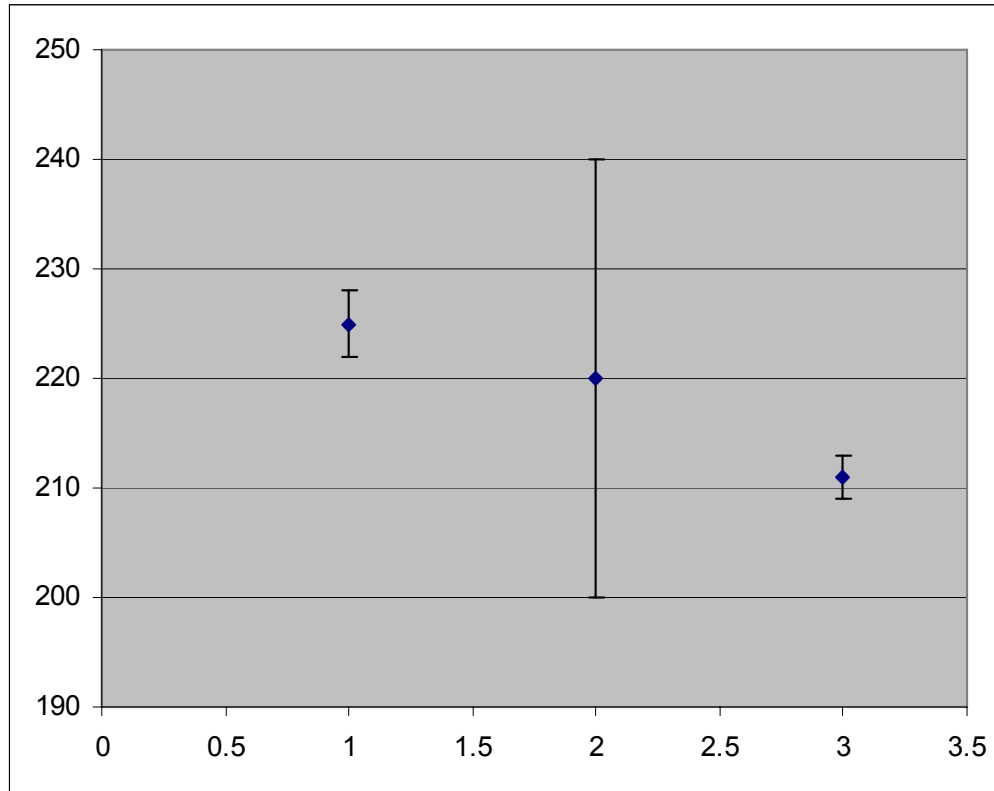
Τελικά ποια από τις μετρήσεις είναι πιο σωστή?...

Μέτρηση...



- Κάθε αποτέλεσμα μίας μέτρησης αποτελεί μία εκτίμηση της μετρούμενης φυσικής ποσότητας, της οποίας η πραγματική τιμή ήταν και παραμένει άγνωστη.
- Κάθε αποτέλεσμα μίας μέτρησης πρέπει να συνοδεύεται και από μία παράμετρο που να δίνει την πληροφορία του πόσο καλή θεωρείται η εκτίμηση (μέτρηση) αυτή.
- Στη μετρολογία, την επιστήμη των μετρήσεων, η παράμετρος αυτή ονομάζεται αβεβαιότητα της μέτρησης.

Μέτρηση ύψους



Συμπεριλαμβάνοντας και την αβεβαιότητα των μετρήσεων αρχίζει να διακρίνεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, και γίνεται πιο ξεκάθαρη η μεταξύ τους σύγκριση.

Αποτέλεσμα Μέτρησης



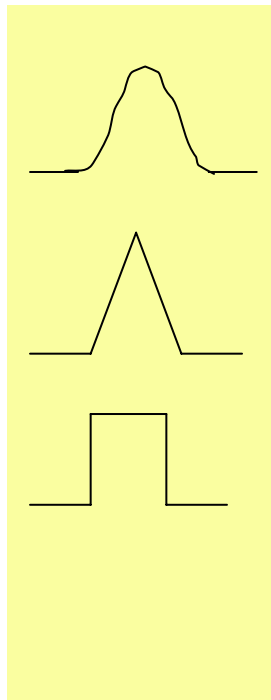
- Το ολοκληρωμένο αποτέλεσμα μιας μέτρησης αποτελείται από:

Την μετρούμενη τιμή

και

την αβεβαιότητα της μέτρησης

GUM-Law of Propagation of Uncertainties (LPU)



$x_1, u(x_1)$

$x_2, u(x_2)$

$x_3, u(x_3)$

$y=f(x_1,x_2,x_3)$

Coverage Prob.

$y, u(y) \longrightarrow y, U(y) \longrightarrow y \pm U(y) \longrightarrow y, [y_{\text{low}}, y_{\text{high}}]$

GUM-Law of Propagation of Uncertainties (LPU)



$$y = F(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad c_i = \left. \frac{\partial F}{\partial X_i} \right|_{x_i}$$

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i \cdot u(x_i)]^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i \cdot c_j \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j)}$$

$$-1 \leq r(x_i, x_j) \leq 1 \text{ for } i \neq j$$

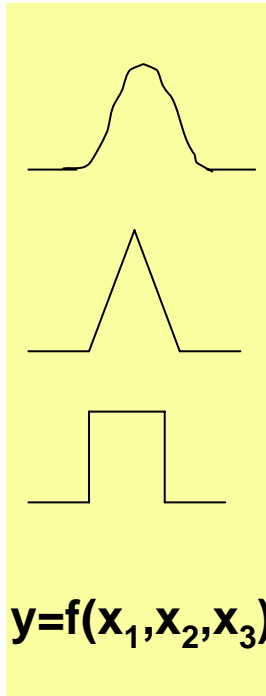
Περιγραφή		$u(x_i)$	κατανομή	c_i	$c_i u_i$	Βαθ. Ελ.
Πρότυπο	x_1	2	κανονική	1	2	50
Θερμοκρασία	x_2	3	τετραγωνική	2	6	50

$$U = k u(y)$$

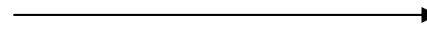
Περιορισμοί του GUM

- Το μοντέλο δεν είναι γραμμικό ή σχεδόν γραμμικό.
- Οι προϋποθέσεις του θεωρήματος του κεντρικού ορίου δεν πληρούνται – άθροισμα πολλών παρόμοιων κατανομών.
- Κατανομές που υπεισέρχονται ή προκύπτουν από τον υπολογισμό δεν είναι συμμετρικές.
- Η τελική κατανομή δεν περιγράφεται ούτε από κανονική ούτε t-κατανομή

Monte Carlo Simulation (MCS)



Monte Carlo
Simulation



$y, u(y), [y'_{low}, y'_{high}]$

Coverage Prob. (C%)

Ρόλος των μετρολογικών Ινστιτούτων



- ✿ Καθορισμός διεθνώς αποδεκτών μονάδων μέτρησης
- ✿ Υλοποίηση των μονάδων μέτρησης με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια
- ✿ Καθιέρωση αλυσίδων ή πυραμίδων ιχνηλασιμότητας

Στόχοι των εργαστηρίων



- ❁ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΤΩΝ ΕΘΝΙΚΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ
- ❁ ΔΙΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ
- ❁ ΠΑΡΟΧΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΕΩΝ
- ❁ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ
- ❁ ΠΑΡΟΧΗ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΜΒΟΥΛΩΝ
- ❁ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥΣ ΚΑΙ ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΦΟΡΕΙΣ
- ❁ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΣΕ ΕΥΡΩΠΑΪΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

Ενημερωτικά...



Τα 16 μετρολογικά εργαστήρια, τα οποία στεγάζονται σε δύο ανεξάρτητα κτιριακά συγκροτήματα εμβαδού 4000 τ.μ. και 1800 τ.μ. αντίστοιχα, διατηρούν τα Ελληνικά Εθνικά Πρότυπα για την υλοποίηση των θεμελιωδών και παραγόμενων μονάδων του Διεθνούς Συστήματος Μονάδων (SI).



Τα εργαστήρια παρέχουν υπηρεσίες διακρίβωσης μετρολογικών οργάνων και λειτουργούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου ISO 17025.



Τα εργαστήρια του ΕΙΜ



ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ:

- ΧΑΜΗΛΩΝ
ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ
- ΥΨΗΛΩΝ
ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ
- ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΙ
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ:

- ΜΕΓΑΛΩΝ ΜΑΖΩΝ
- ΜΙΚΡΩΝ ΜΑΖΩΝ
- ΔΥΝΑΜΗΣ
- ΡΟΠΗΣ
- ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ
- ΟΓΚΟΥ/ΡΟΗΣ
- ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ
- ΠΙΕΣΗΣ
- ΙΞΩΔΟΥΣ

ΦΥΣΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ:

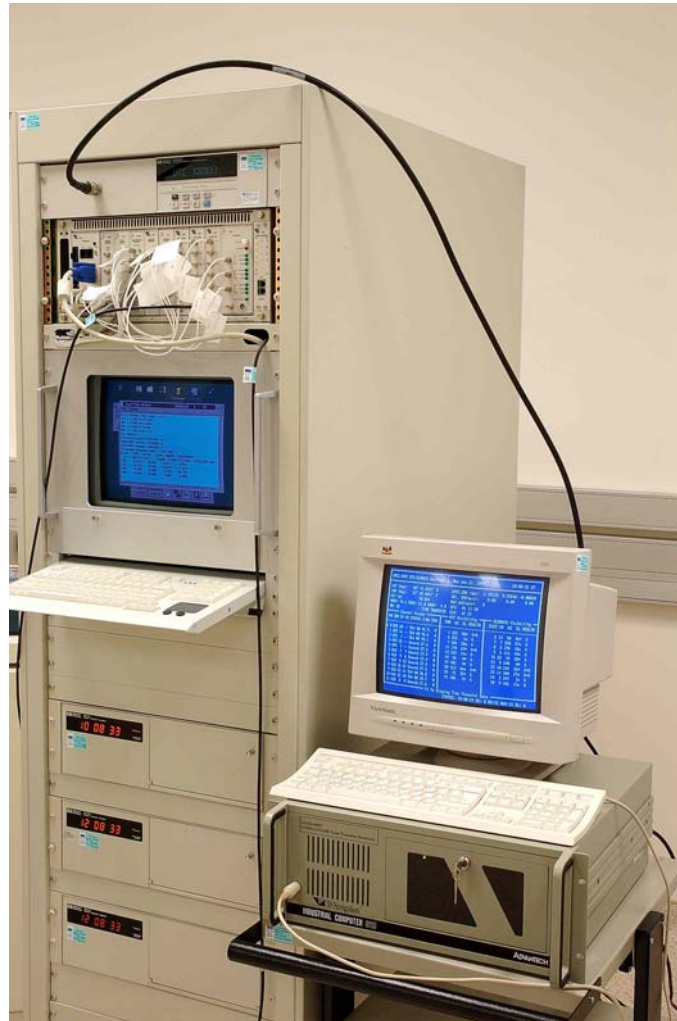
- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ
ΥΓΡΑΣΙΑΣ
- ΔΙΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ
- ΟΠΤΙΚΩΝ
/ΦΩΤΟΜΕΤΡΙΑΣ
- ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ/ΔΟΝΗΣΕΩΝ

Το Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας, ΕΙΜ

ΒΙ.ΠΕ.Θ Σίνδος, ww.eim.gr



Το πρότυπο Χρόνου



Πρωτεύον πρότυπο Ηλεκτρικής DC Τάσης (Josephson)



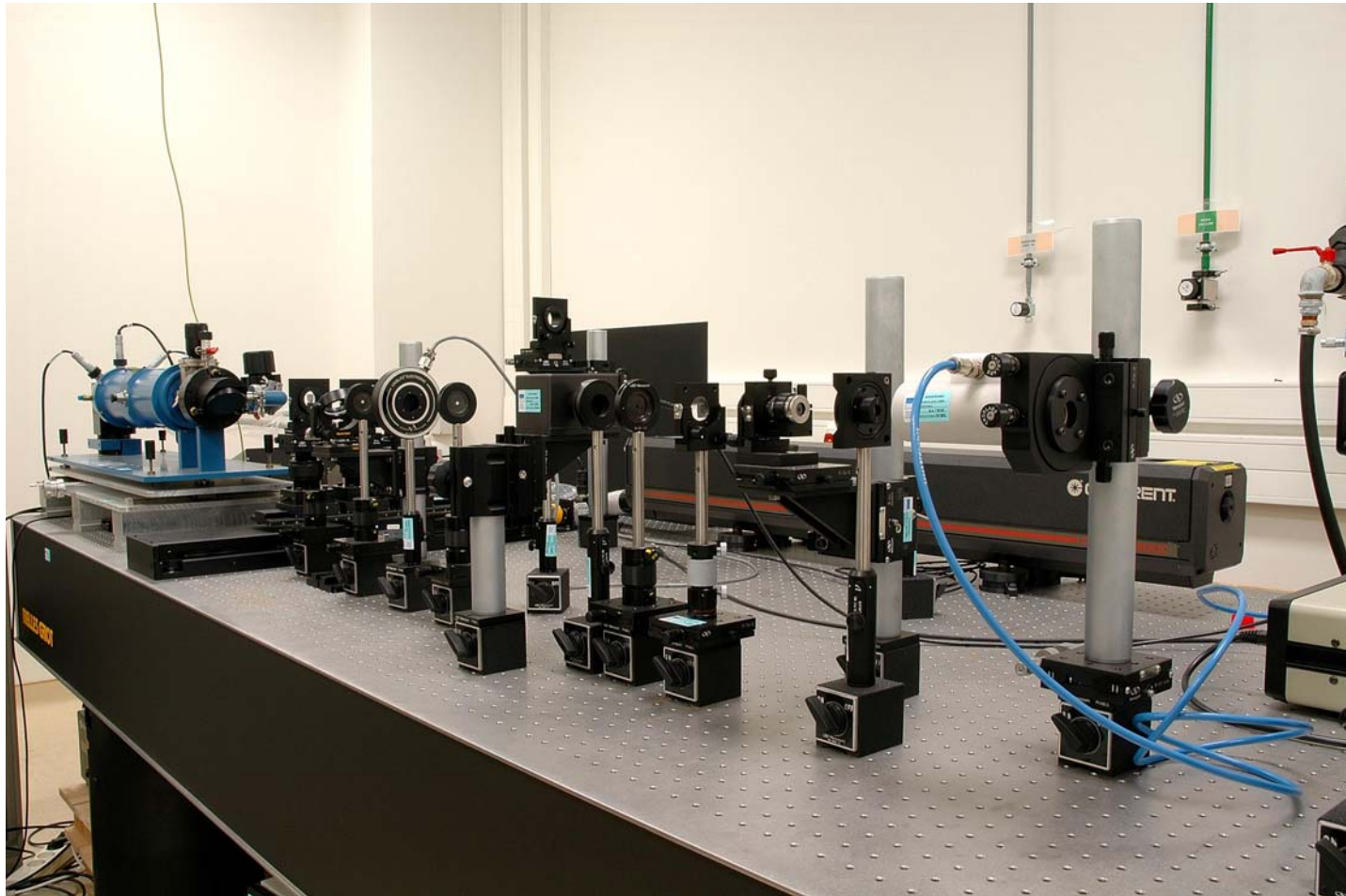
Κβαντικό Πρωτεύον πρότυπο Ηλεκτρικής Αντίστασης (Hall)



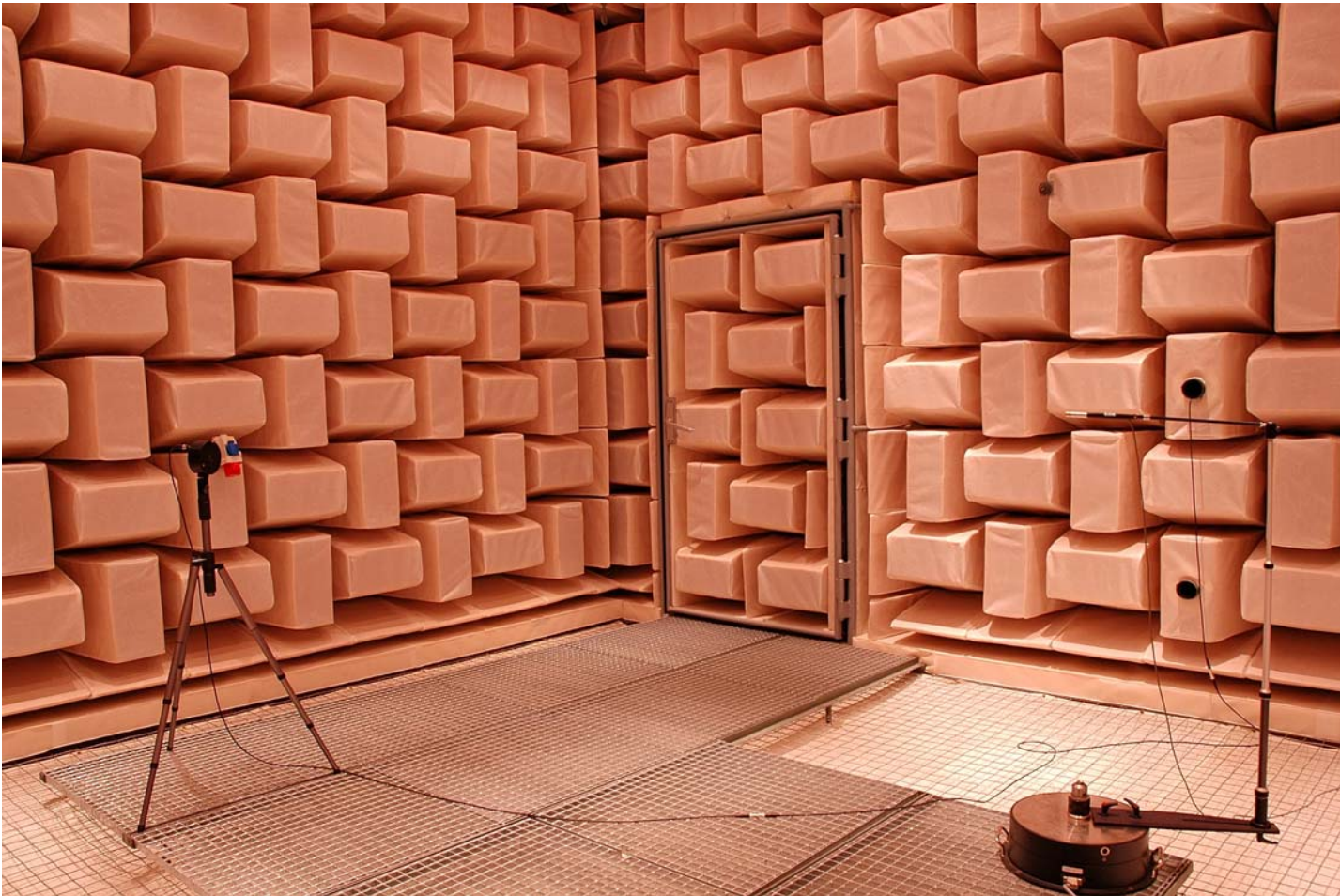
Εργαστήριο Μεγάλων Μαζών



Κρυογενικό Ραδιόμετρο



Ανηχωϊκός Θάλαμος



Το Εθνικό Πρότυπο Δύναμης: Μηχανή νεκρού φορτίου 110 kN



Υλοποίηση Μέτρου



Ορισμός μέτρου 1791



- Το μέτρο ορίστηκε για πρώτη φορά το 1791 ως το “1/10 000 000 του ενός τετάρτου του μεσημβρινού που περνάει από το Παρίσι”.



Ιστορική Αναδρομή (συν...)



- Χρειάστηκαν 6 χρόνια για να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις του μεσημβρινού.
- Στόχος ήταν ο ορισμός του μέτρου να γίνει κατ' αυτό το τρόπο με ακρίβεια 10^{-7} . Παρόλα αυτά λόγω λάθους στους υπολογισμούς του μήκους του μεσημβρινού, το πρώτο πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε μέχρι και το 1889 ήταν 0.2 mm πιο κοντό.

Μήκος μεσημβρινού γης = 20 003,93 Km \sim 20 004 km

- Το 1889 ένα καινούριο πρότυπο φτιάχτηκε με ακρίβεια 10^{-4} στους 0 °C.
- Η υλοποίηση της μονάδας του μέτρου πραγματοποιούνταν από τότε και μέχρι το 1960 με μία ράβδο από ιριδιούχο λευκόχρυσο.
- Από το 1960 και μέχρι το 1983 χρησιμοποιώντας την ακτινοβολία στο κενό που εκπέμπεται λόγω της $2p_{10}-5d_5$ μετάπτωσης των ηλεκτρονίων του 86 Kr το μέτρο ορίζονταν ως

$$1\text{m} = 1650763.73 \lambda_{\text{Kr}}, \quad \lambda_{\text{Kr}} = 6057.802103 \text{ \AA}$$

Ορισμός του Μέτρου



- Από το 1983 το μέτρο ορίζεται ως

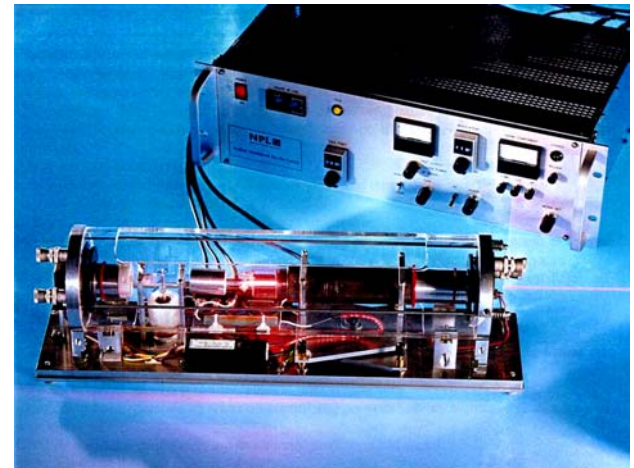
“η απόσταση που διανύει το φως σε 1/299 792 458 δευτερόλεπτα”.

Ταχύτητα του φωτός: $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$

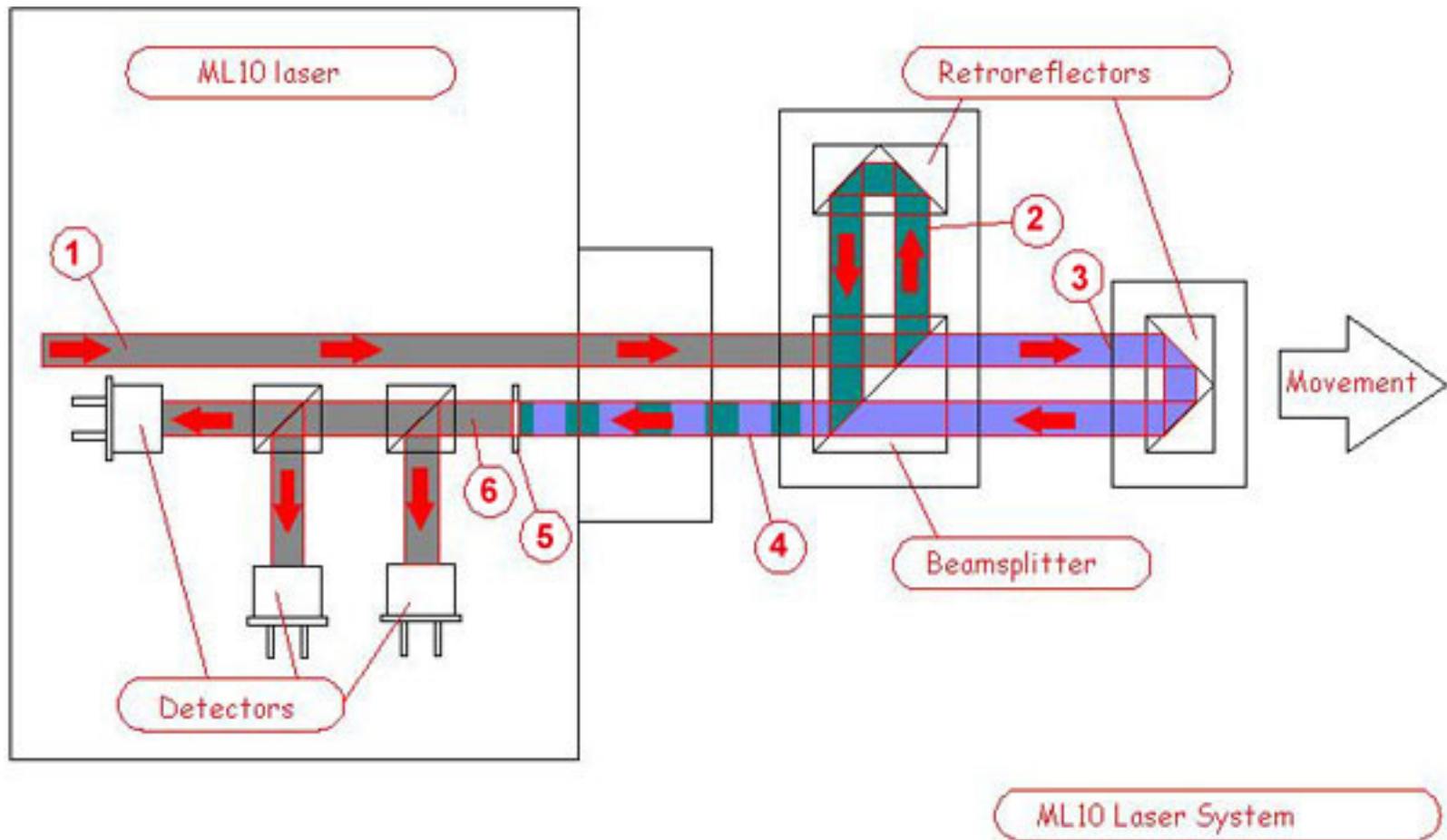
Υλοποίηση του Μέτρου



- He-Ne Λέιζερ με δια ιωδίου σταθεροποιημένη συχνότητα (iodine-stabilized helium-neon laser)
- Το μήκος κύματος του είναι γνωστό με ακρίβεια καλύτερη από 0.000 000 000 000 000 02 m



Διαστασιακές Μετρήσεις με Συμβολομετρία



Διακρίβωση Πλακιδίων Μήκους με Συμβολομετρία

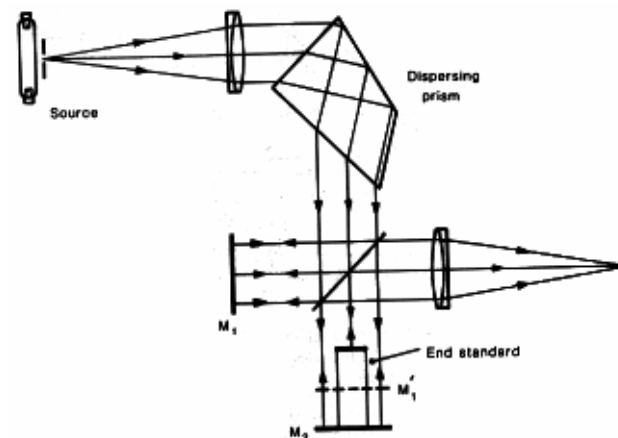
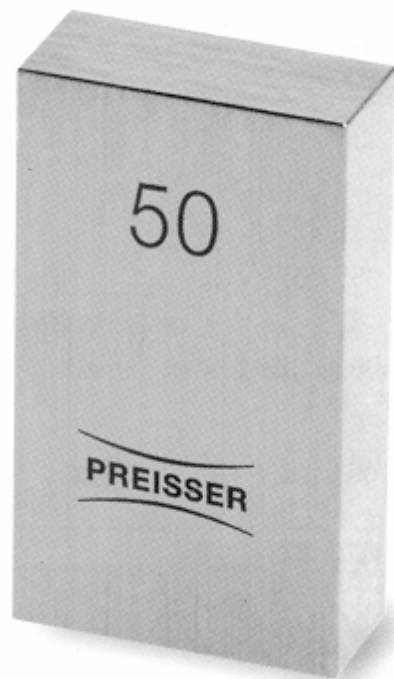


Figure 8.1: Kosters interferometer for end standards.

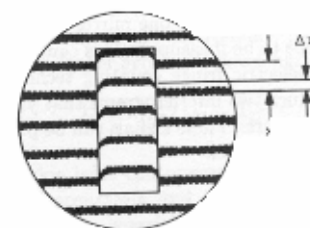


Figure 8.2: Interference fringes in a Kosters interferometer

Διακρίβωση Πλακιδίων Μήκους



Με συμβολομετρία



21.3.2002

Με σύγκριση



30.10.2001

Femtosecond laser combs



- Nobel Prize in Physics 2005
"for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique"

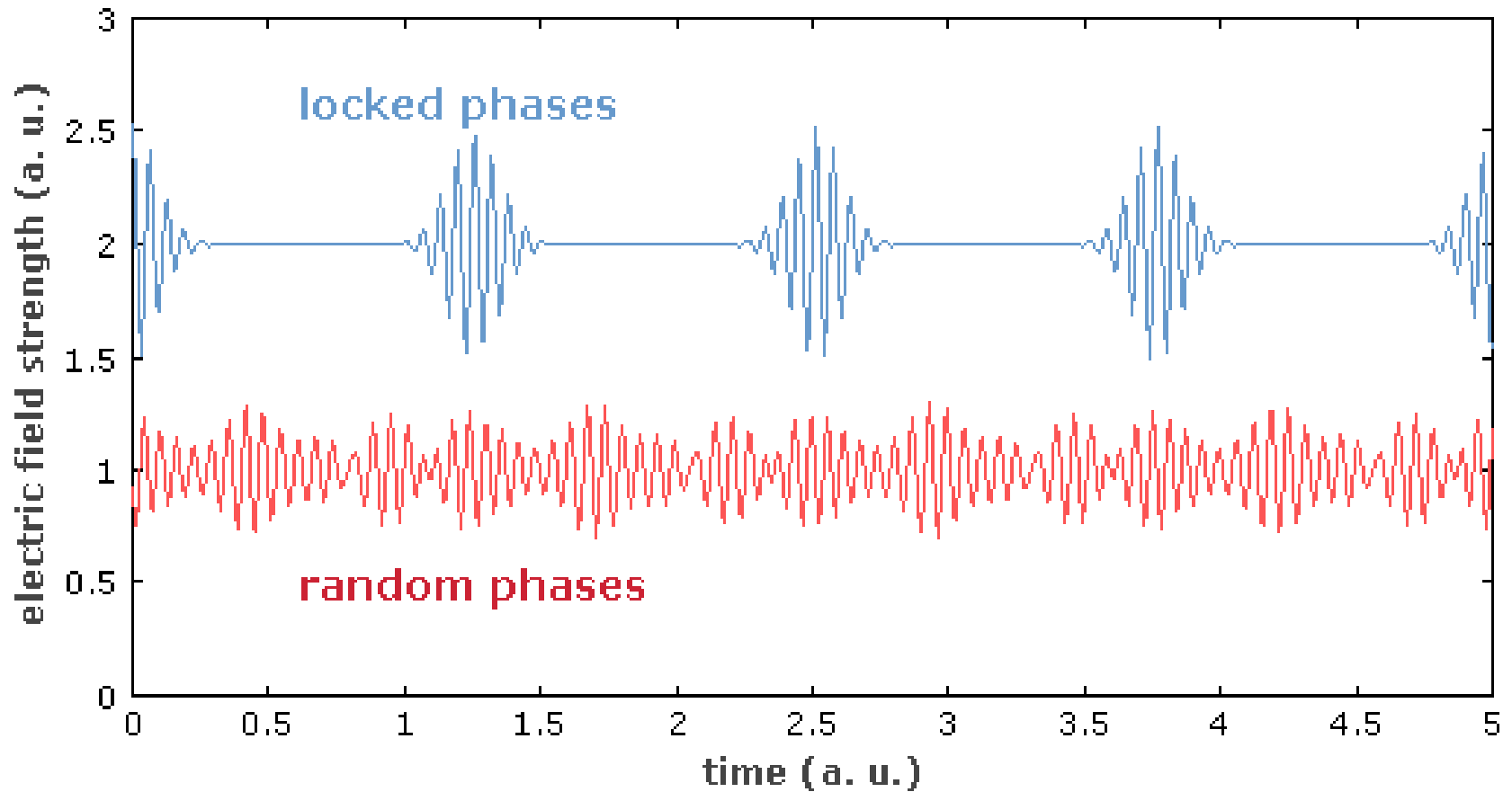
John L. Hall

University of Colorado, JILA; National Institute of Standards and Technology
Boulder, CO, USA

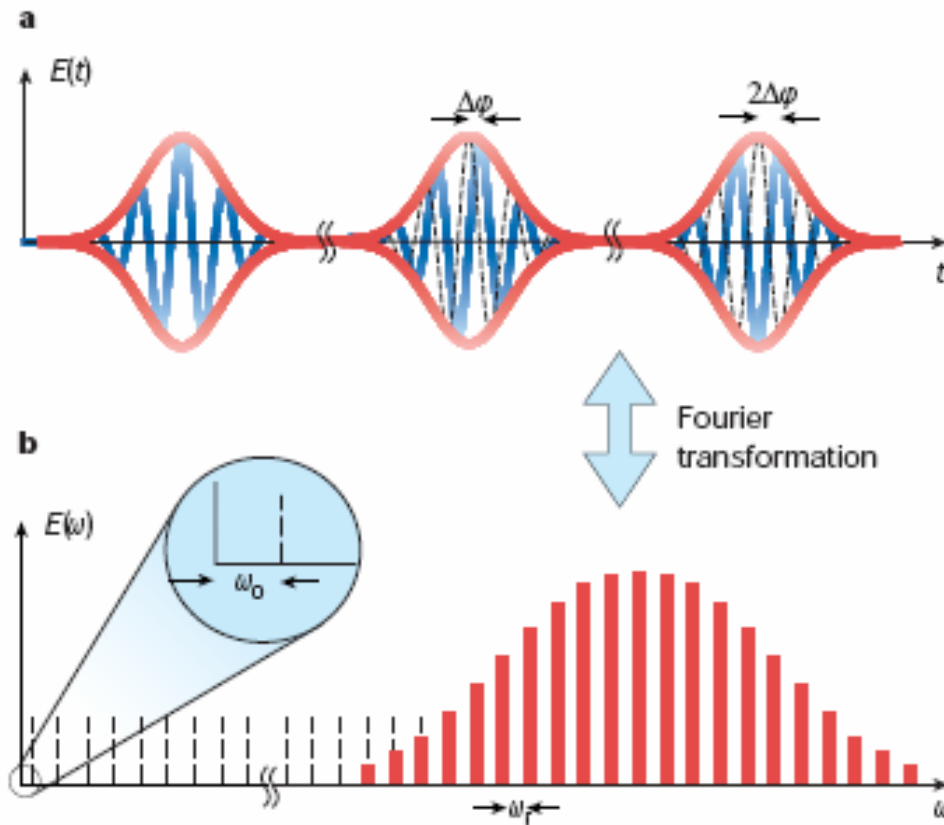
Theodor W. Hänsch

Max-Planck-Institut für Quantenoptik
Garching, Germany; Ludwig-Maximilians- Universität
Munich, Germany

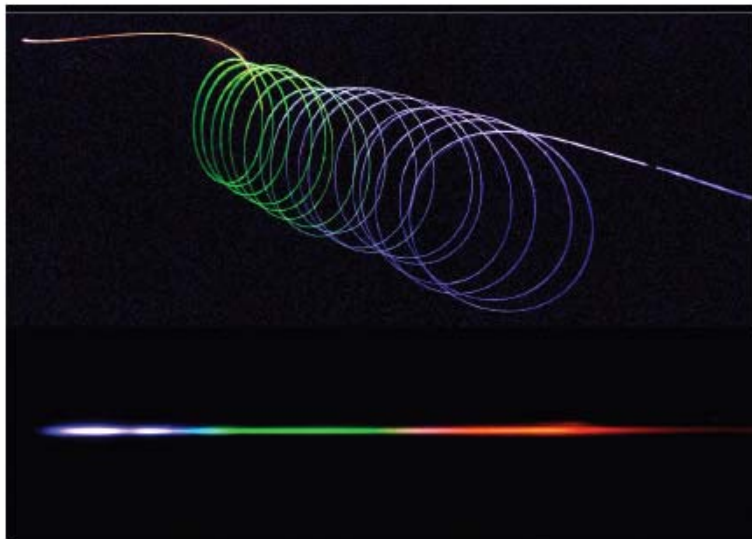
Mode locked laser



Mode locked laser



Octave-spanning frequency combs



„Rainbow Fiber“

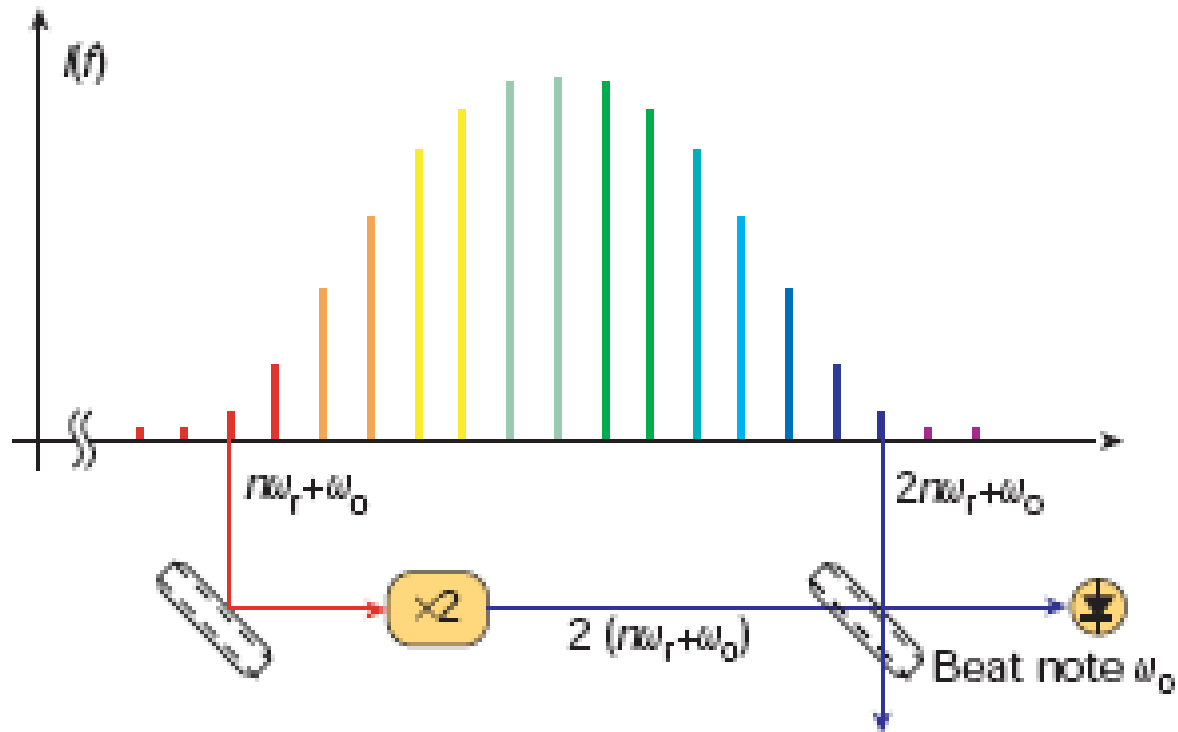
(Lucent Technologies, 1999)



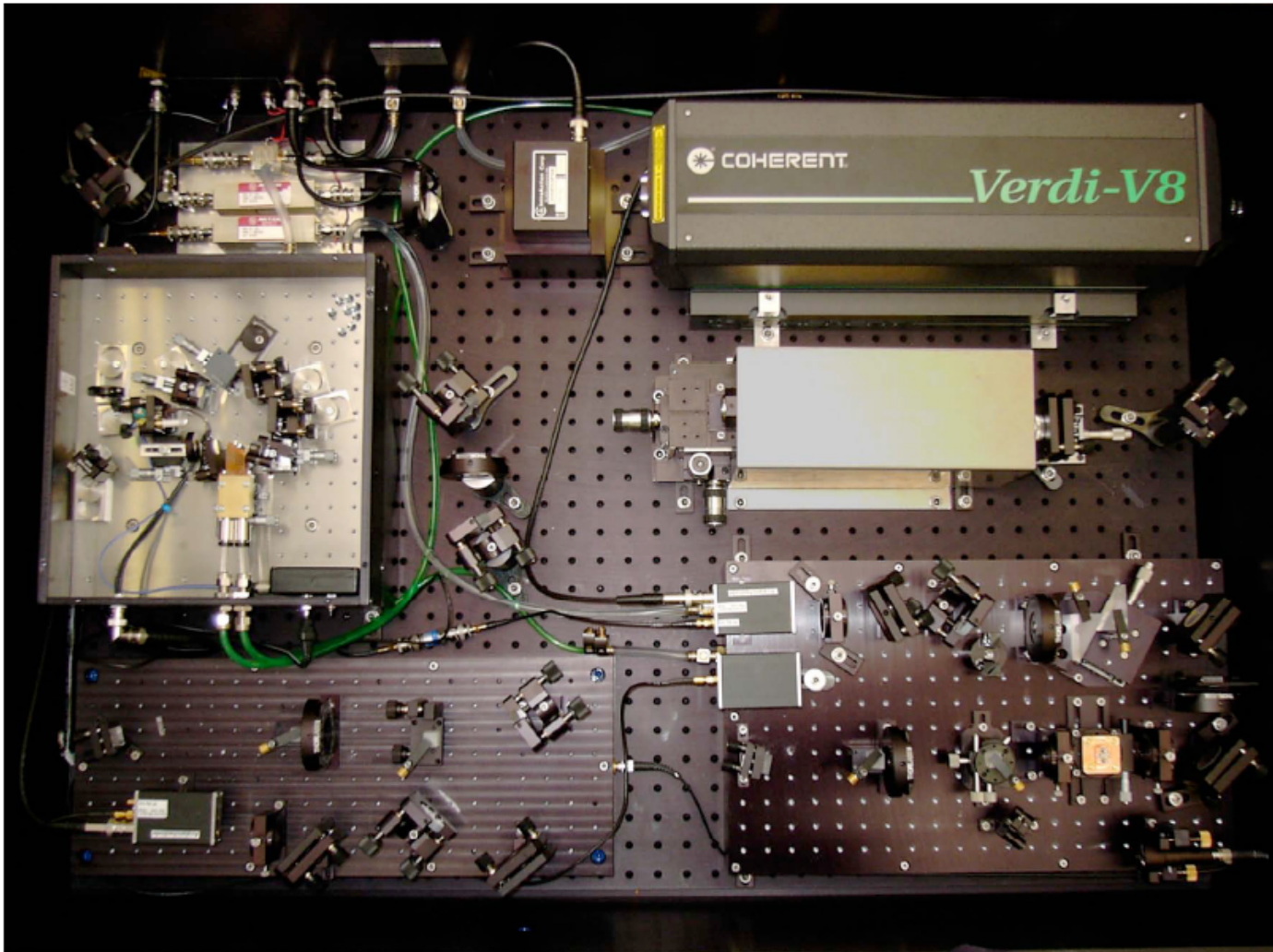
“Photonic Crystal Fiber”

J.C. Knight, W.J. Wadsworth, P. St. Russell
University of Bath, UK

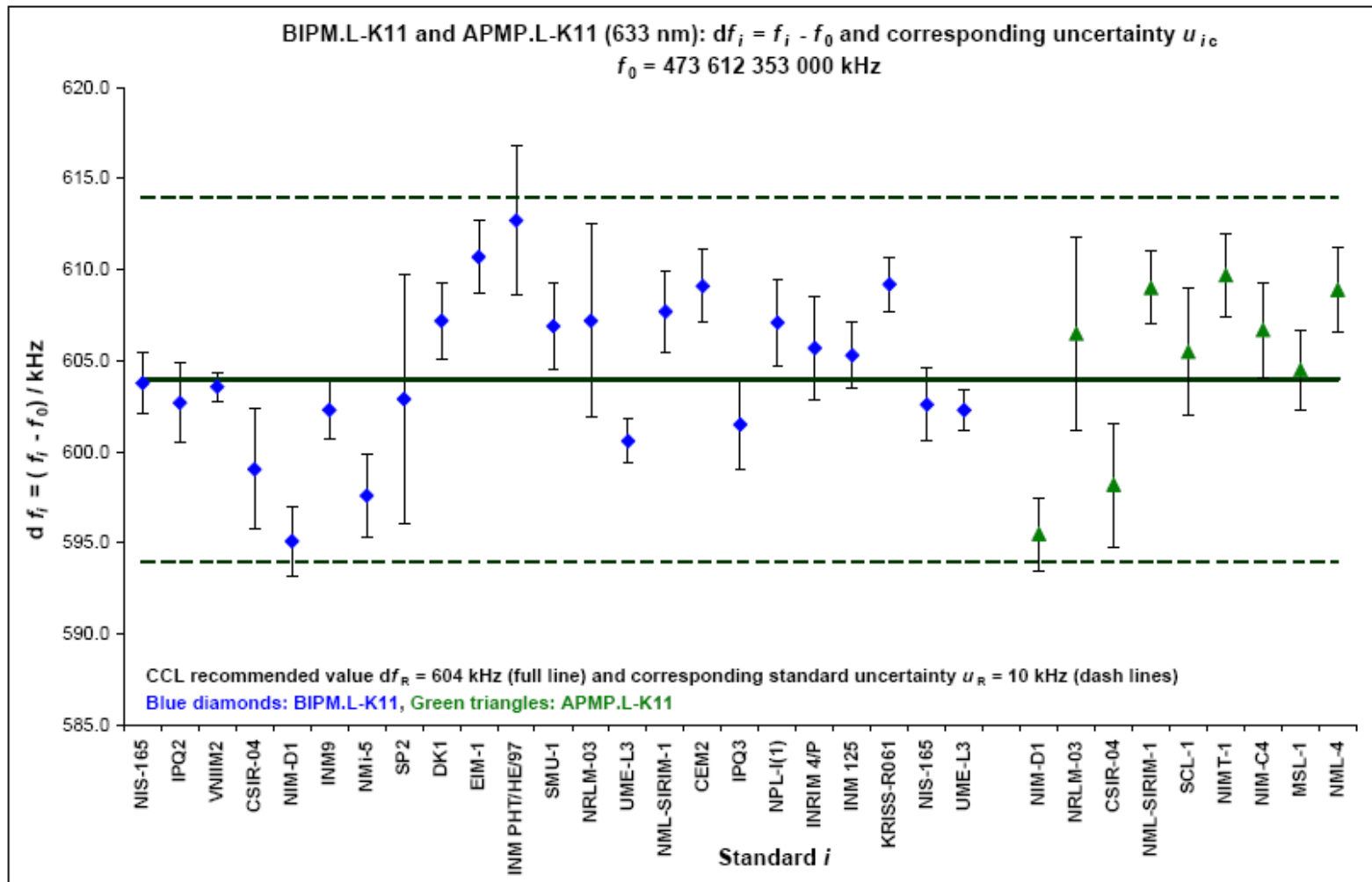
Octave-spanning frequency combs



Femtosecond laser combs system



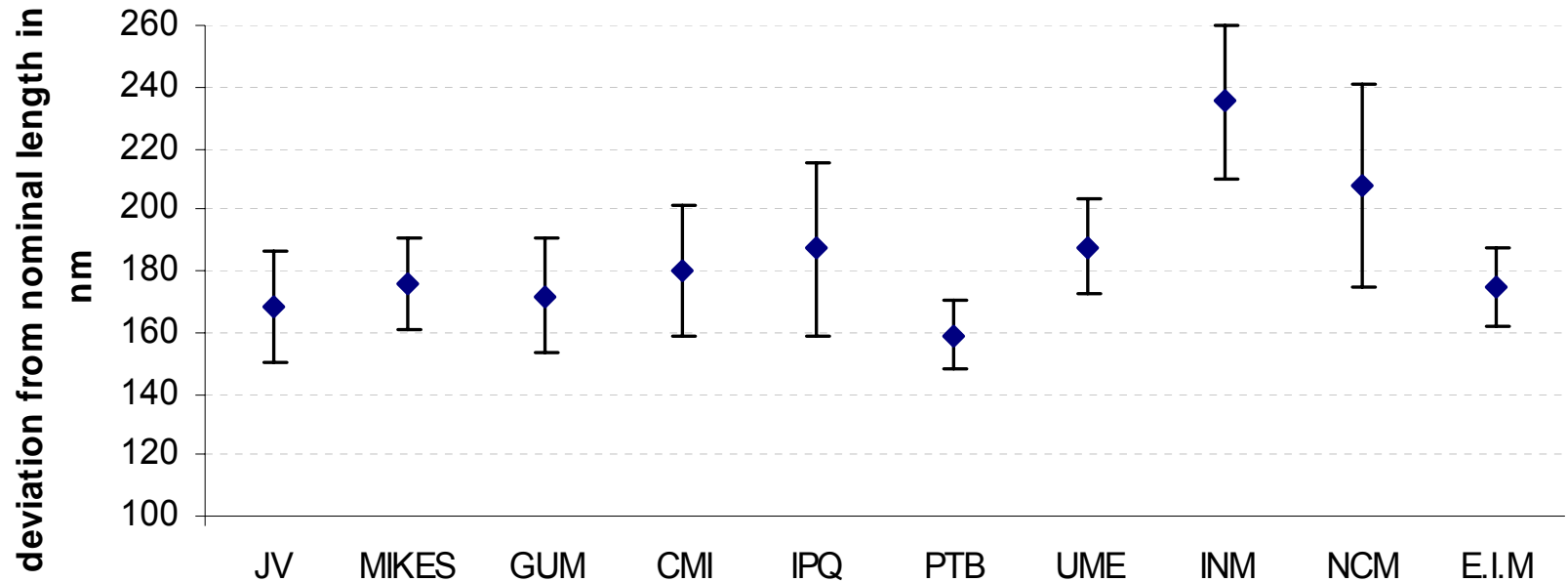
BIPM.L K11 Διεργαστηριακή



Διεργαστηριακή: EUROMET 643



Fig 3h: 100 mm tungsten carbide gauge block



$$l = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q (\kappa_i + F_i) \frac{\lambda_i}{2n} + \Delta t_g \cdot \alpha \cdot L + \delta l_{\Omega} + \Delta l_S + \delta l_A + \delta l_G + \delta l_W + \Delta l_{\Phi}$$

Μονάδες SI



- **Μέτρο (m)** είναι το μήκος της απόστασης που διανύει το φως στο κενό μέσα σε χρονικό διάστημα $1/299\,792\,458$ του δευτερολέπτου.
→ $c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ εξ ορισμού.
- **Δευτερόλεπτο (s)** είναι η χρονική διάρκεια $9\,192\,631\,770$ περιόδων της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στη μετάβαση μεταξύ των δύο ενεργειακών σταθμών της υπέρλεπτης υφής της βασικής κατάστασης του ατόμου του καισίου ^{133}Cs .
→ $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}} = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$ εξ ορισμού.
- **Το χιλιόγραμμα (kg)** είναι η μονάδα της μάζας. Είναι ίσο με τη μάζα του διεθνούς προτύπου του χιλιόγραμμου.
→ $m(\text{προτύπου χιλιόγραμμου}) = 1 \text{ kg}$ εξ ορισμού.
- **Κέλβιν (K)**, η μονάδα της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας, είναι ο λόγος $1/273,16$ της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας του τριπλού σημείου του νερού.
→ Η θερμοδυναμική θερμοκρασία του τριπλού σημείου του νερού = $273,16 \text{ K}$ εξ ορισμού.

Μονάδες SI



- **Αμπέρ (A)** είναι η σταθερή ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, η οποία εφόσον διατηρείται ανάμεσα σε δύο ευθείς παράλληλους αγωγούς άπειρου μήκους, αμελητέας κυκλικής διατομής, και σε απόσταση 1 μέτρου στο κενό, παράγει δύναμη ανάμεσα στους αγωγούς ίση με 2×10^{-7} newton ανά μέτρο μήκους.
→ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m εξ ορισμού.
- **Γραμμομόριο (mol)** είναι η ποσότητα ουσίας ενός συστήματος, το οποίο περιέχει τόσες στοιχειώδης οντότητες όσες τα άτομα που υπάρχουν σε 0,012 χιλιόγραμμα άνθρακα 12.
Όταν το γραμμομόριο χρησιμοποιείται, οι στοιχειώδης οντότητες πρέπει να καθορίζονται και μπορεί να είναι άτομα, μόρια, ιόντα, ηλεκτρόνια, άλλα σωματίδια ή καθορισμένες ομάδες τέτοιων σωματιδίων.
→ $M(^{12}\text{C}) = 12$ g/mol εξ ορισμού.
- **Καντέλα (cd)** είναι η φωτεινή ένταση, σε μια καθορισμένη κατεύθυνση, μιας πηγής που εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία συχνότητας 540×10^{12} hertz, η οποία έχει ακτινοβολούμενη ένταση στη διεύθυνση αυτή ίση με $1/683$ watt ανά steradian.
→ Η φωτεινή απόδοση μονοχρωματικής ακτινοβολίας 540×10^{12} hertz είναι εξ ορισμού 683 lm/W.

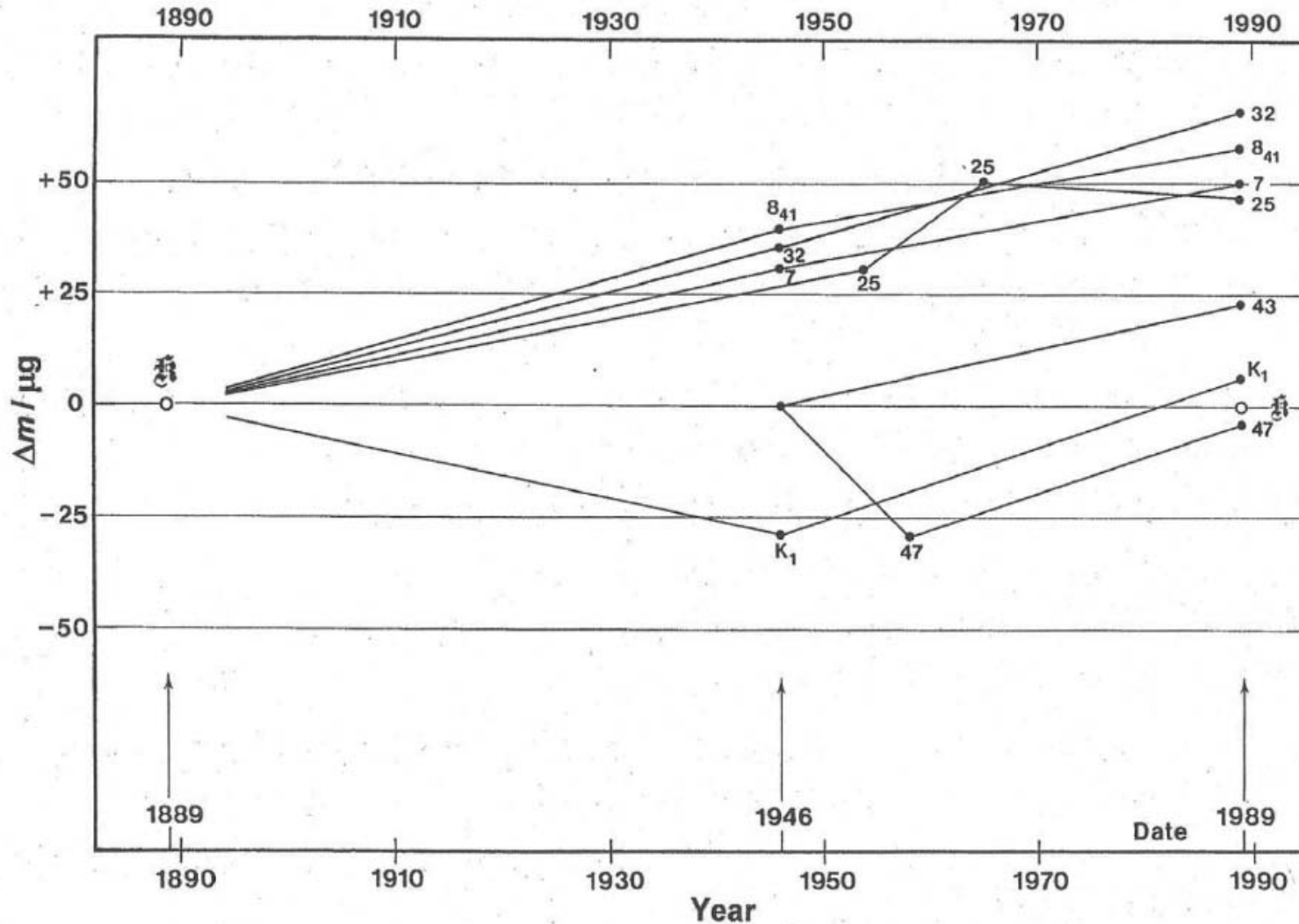
Πρότυπα χιλιόγραμμα



The international prototype of the kilogram, \mathcal{K} , the only remaining artefact used to define a base unit of the SI.



Σύγκριση προτύπου μάζας με επίσημα αντίγραφα.



Νέες Μονάδες SI - 2011

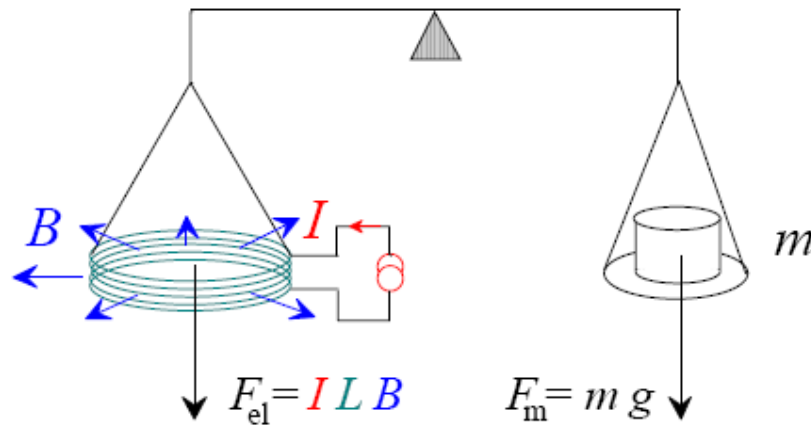


- Είναι αρκετά πιθανό το 2011 κατά την 24η *Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM* να αλλάξουν οι ορισμοί του χιλιόγραμμου, του αμπέρ, του κέλβιν, και του γραμμομορίου.

Νέες Μονάδες SI

- **Το χιλιόγραμμα (kg)**, η μονάδα της μάζας, είναι τόση ώστε η σταθερά του Planck να είναι ακριβώς ίση με $6,626\ 069\ 3\ 10 \times 10^{-34} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.
- **Το Αμπέρ (A)**, η μονάδα του ηλεκτρικού ρεύματος, είναι τόση ώστε το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο να είναι ακριβώς ίσο με $1,602\ 176\ 59 \times 10^{-19} \text{ coulomb}$.
- **Το Κέλβιν (K)**, η μονάδα της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας, είναι τόση ώστε η σταθερά του Boltzmann να είναι ακριβώς ίση με $1,380\ 650\ 5 \times 10^{-23} \text{ joule/Kelvin}$.
- **Το γραμμομόριο (mol)** είναι η ποσότητα της ουσίας ενός συστήματος, το οποίο περιέχει ακριβώς $6,022\ 141\ 5 \times 10^{23}$ καθορισμένες στοιχειώδης οντότητες, οι οποίες μπορεί να είναι άτομα, μόρια, ιόντα, ηλεκτρόνια, άλλα σωματίδια ή καθορισμένες ομάδες τέτοιων σωματιδίων.

Watt Balance



$$m g = I L B$$

$$m g v = U I$$

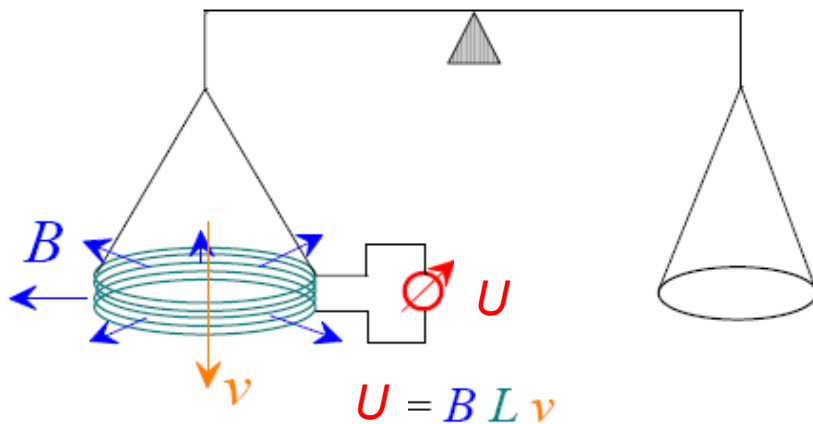
$$m g v = U^2 / R$$

Quantum Hall conductivity

$$\sigma = n e^2 / h$$

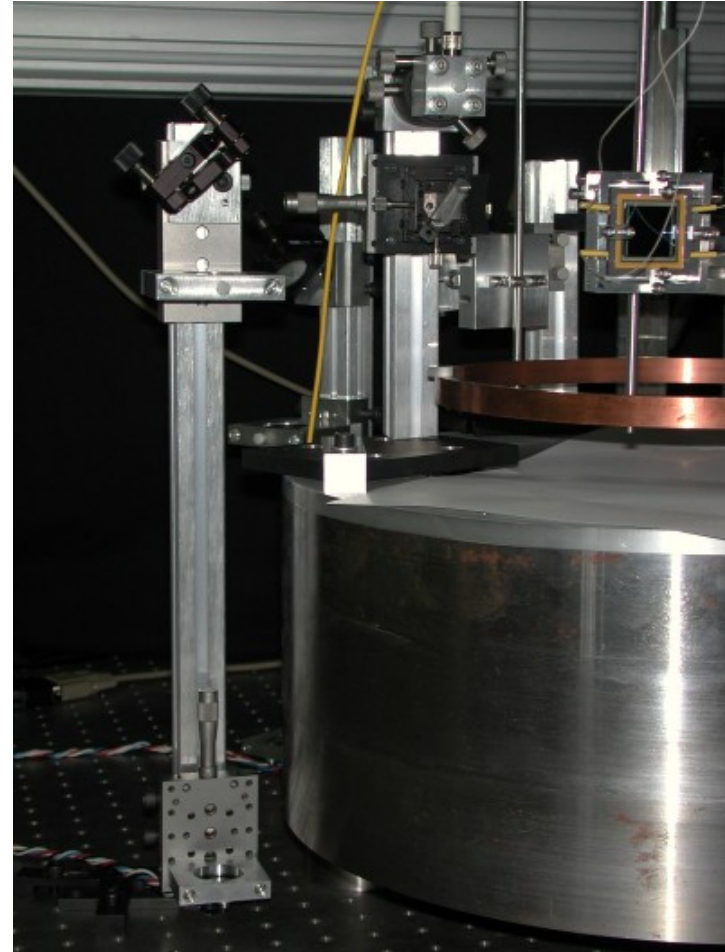
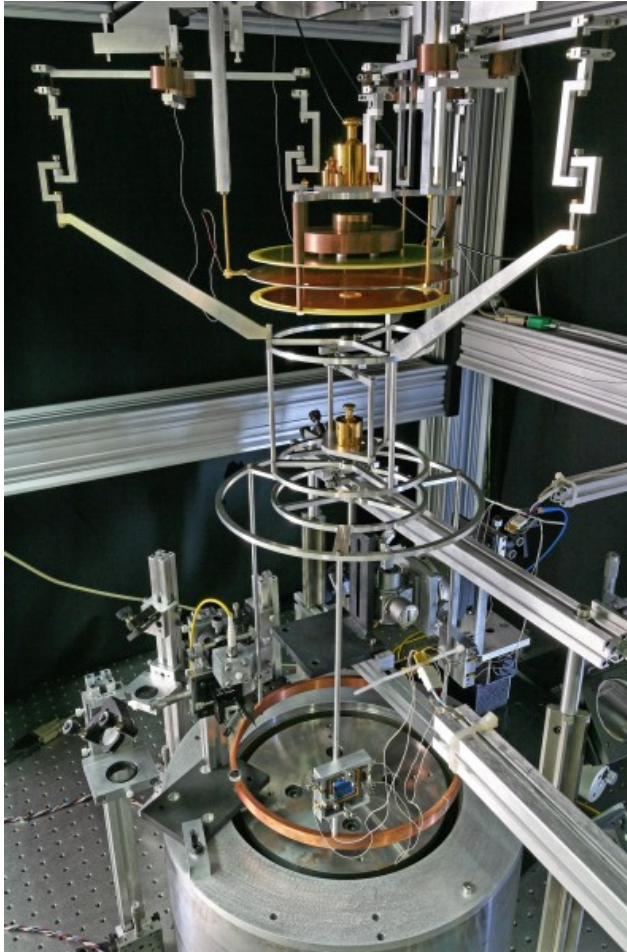
Josephson effect

$$U = p \omega \hbar / 2 e = m f h / 2 e$$

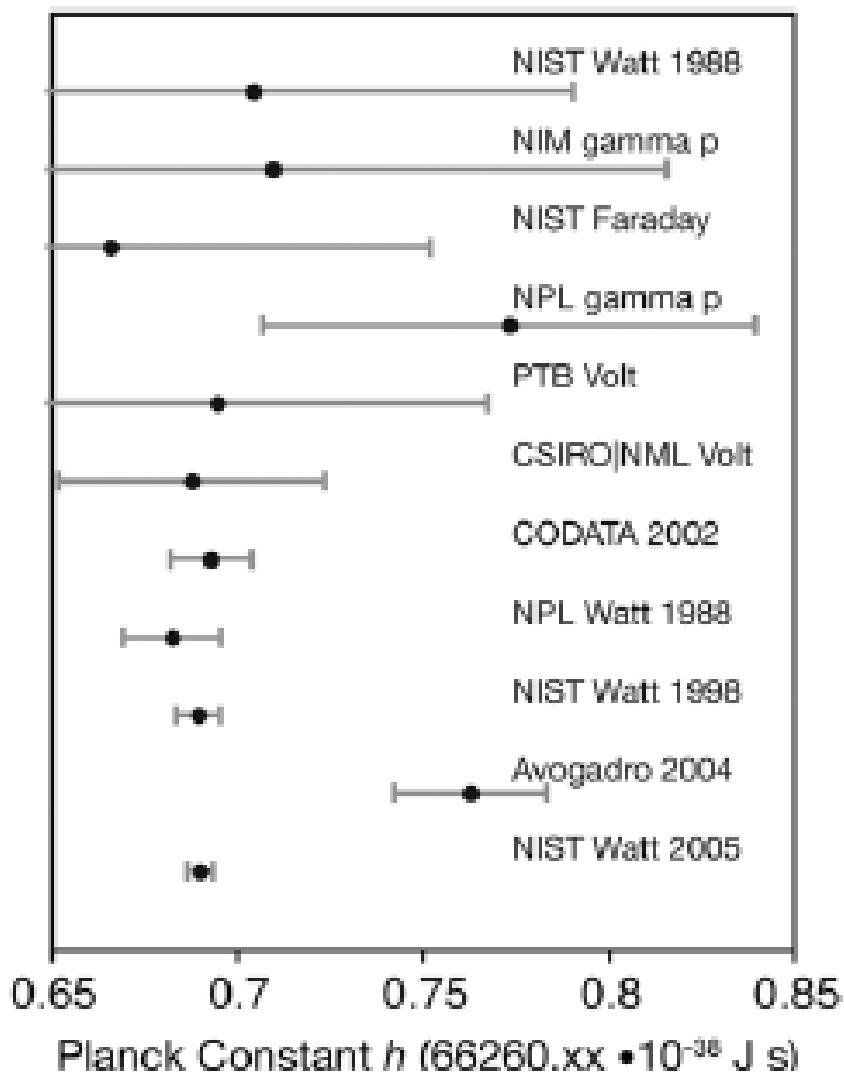


$$m = p_1 p_2 f_1 f_2 n \frac{1}{g v} \frac{h}{4}$$

BIPM Watt Balance



Η τιμή της σταθεράς του Plank





Amper

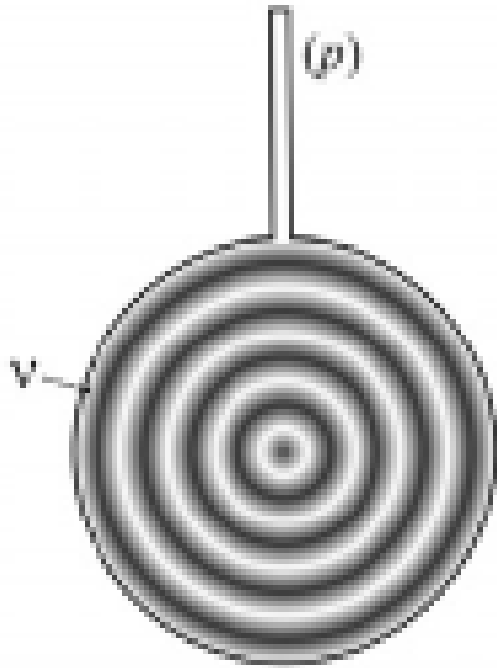
- *Quantum Hall Conductivity*

$$\sigma = n e^2 / h$$

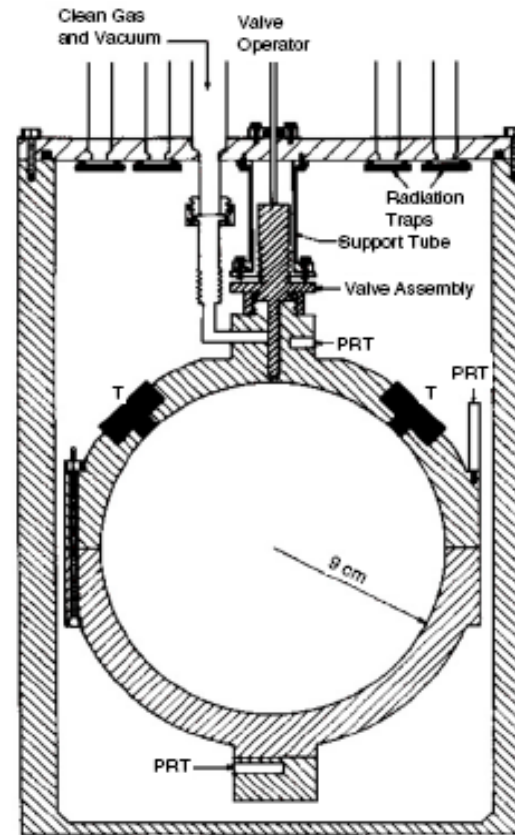
- *Josephson effect*

$$U = p \omega \hbar / 2 e = m f h / 2 e$$

Σταθερά Boltzman



$$k = \frac{Mu_o^2}{N_A\gamma_o T}$$



Mole

$$M(X) = A_r(X) \frac{M(^{12}\text{C})}{12} = A_r(X) M_u$$

- With SI $M_u = 1 \text{ g/mol}$
- With New SI $M_u = 1.000\,000\,000\,0(14) \text{ g/mol}$
- Για το πυρίτιο: ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si
 $A_r(\text{Si}) = 28.0855(3)$
και συνεπώς και στις δύο περιπτώσεις
 $M(\text{Si}) = 28.0855(3) \text{ g/mol}$

Relative standard uncertainties for a selection of fundamental constants multiplied by 10^8 (i.e. in parts per hundred million)



constant	current SI	new SI
$m(\mathcal{K})$	0	5.0
h	5.0	0
e	2.5	0
k_B	170	0
N_A	5.0	0
R	170	0
F	2.5	0
σ	700	0
m_e	5.0	0.14
m_u	5.0	0.14
$m(^{12}\text{C})$	5.0	0.14
$M(^{12}\text{C})$	0	0.14

constant	current SI	new SI
α	0.068	0.068
K_J	2.5	0
R_K	0.068	0
μ_0	0	0.068
ϵ_0	0	0.068
Z_0	0	0.068
$\text{J} \leftrightarrow \text{kg}$	0	0
$\text{J} \leftrightarrow \text{m}^{-1}$	5.0	0
$\text{J} \leftrightarrow \text{Hz}$	5.0	0
$\text{J} \leftrightarrow \text{K}$	170	0
$\text{J} \leftrightarrow \text{eV}$	2.5	0

Βιβλιογραφικές αναφορές



- International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms VIM, 3rd edition, JCGM 200:2008
<http://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html>
- Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections)
- Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Propagation of distributions using a Monte Carlo method JCGM 101:2008
- Evaluation of measurement data – An introduction to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" and related documents JCGM 104:2009
<http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>
- P. J. Mohr, B. N. Taylor, and D. B. Newell, *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2006*, Rev. Mod. Phys. **80**, 633 (2008).
- Mills, I.M., et al., Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005). *Metrologia*, **43**(3), 227 (2006).
- Taylor, B.N., Molar mass and related quantities in the New SI. *Metrologia*, **46**(3), L16 (2009).
- Fellmuth, B., C. Gaiser, and J. Fischer, Determination of the Boltzmann constant—status and prospects. *Measurement Science and Technology*, **17**, R145 (2006).
- Becker, P., et al., Considerations on future redefinitions of the kilogram, the mole and of other units, *Metrologia*, **44**, 1 (2007).
- T. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, Optical frequency metrology, *Nature* **416**, 233 (2002).