

## Το διεθνές σύστημα μονάδων

**Γιατί χρειάζεται να ορίσουμε κοινές μονάδες μέτρησης με μεγάλη ακρίβεια;**

Η απάντηση είναι για να καλύψουμε τις τεχνολογικές μας ανάγκες. Ας αρχίσουμε για παράδειγμα από την υπηρεσία GPS. Δηλαδή την παγκόσμια υπηρεσία προσδιορισμού θέσης ενός σημείου του πλανήτη. Ο προσδιορισμός της θέσης γίνεται γεωμετρικά με τη βοήθεια δορυφόρων. Το σημείο που θέλουμε να προσδιορίσουμε τη θέση του, εκπέμπει ένα σήμα προς τρεις τουλάχιστον δορυφόρους και ανάλογα με το χρόνο που κάνει το σήμα για να φθάσει σε αυτούς βρίσκεται η απόσταση που το χωρίζει από αυτούς, οπότε με γνωστές τις 3 τουλάχιστον αποστάσεις βρίσκεται η συντεταγμένη του σημείου. Με πόση όμως ακρίβεια πρέπει να μετρηθεί αυτός ο χρόνος ώστε ο προσδιορισμός του σημείου να γίνει με ακρίβεια το πολύ ενός dm; Δεδομένου ότι τα η/μ κύματα κινούνται με την ταχύτητα του φωτός  $\approx 3 \times 10^8$  m/s ο χρόνος πρέπει να προσδιοριστεί με ακρίβεια τουλάχιστον

$$0,1/3 \times 10^8 \text{s} = 0,00000000033 \text{s} \quad (1)$$

Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να πετύχουμε δύο πράγματα. Πρώτον να μπορεί ένα εργαστήριο να μετράει το χρόνο τουλάχιστον με αυτή την ακρίβεια και δεύτερον ίσως δυσκολότερο, να μπορούν δύο ή και περισσότερα εργαστήρια να είναι μεταξύ τους σωστά συγχρονισμένα - καλιμπραρισμένα. Δηλαδή να βρίσκουν το ίδιο αποτέλεσμα χρόνου μετρώντας το ίδιο χρονικό διάστημα ώστε να μην υπάρχουν συστηματικά σφάλματα.

Για το πρώτο, δηλαδή την ακριβή μέτρηση του χρόνου το θέμα λύθηκε όταν μπορέσαμε και φτιάξαμε γεννήτριες συχνοτήτων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μεγάλης ακρίβειας με τη βοήθεια κρυστάλλων. Έτσι μπορούμε να παράγουμε ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην περιοχή των μικροκυμάτων της τάξεως των GHz με ακρίβεια Hz. Μπορούμε δηλαδή να ρυθμίσουμε μία γεννήτρια συχνοτήτων να παράγει η/μ κύμα για παράδειγμα

$$f = 9.192.631.770 \pm 1 \text{Hz}. \quad (2)$$

Επειδή ως γνωστό η περίοδος είναι το αντίστροφο της συχνότητας, η γεννήτρια αυτή είναι ουσιαστικά ένα ρολόι με την απαιτούμενη για τις ανάγκες μας ακρίβεια (1).

Το θέμα είναι αν μία άλλη γεννήτρια σε ένα άλλο εργαστήριο που έχει ρυθμιστεί ώστε να παράγει την ίδια συχνότητα (2) είναι στην πραγματικότητα ίδια ή μήπως διαφέρει πχ κατά 100 Hz. Γιατί αν διαφέρει κατά 100Hz ή και παραπάνω, τότε δεν μπορούν να συνεργαστούν αυτά τα εργαστήρια μεταξύ τους ώστε να δημιουργήσουν ένα δίκτυο GPS με την ακρίβεια του 1dm που θέλουμε μολονότι το καθένα διαθέτει ένα ρολόι της απαιτούμενης ακρίβειας (1).

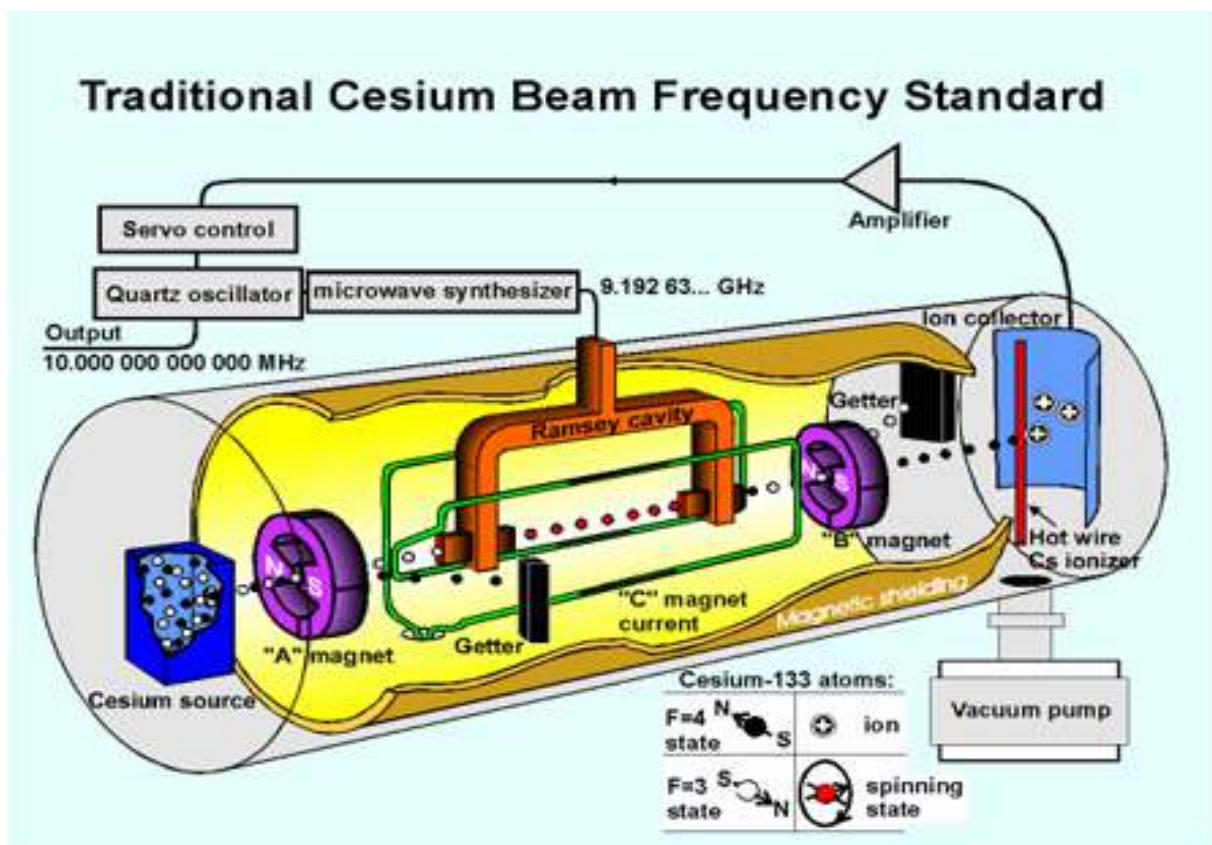
Για να λύσουμε αυτό το πρόβλημα πρέπει να βρεθεί ένα φυσικό φαινόμενο που να έχει τη ίδια χρονική διάρκεια σε οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη ώστε να χρησιμοποιηθεί για το συγχρονισμό των συχνοτήτων των γεννητριών-ρολογιών των διαφόρων εργαστηρίων.

Το πρόβλημα αυτό λύθηκε χρησιμοποιώντας τις αρχές των φασμάτων εκπομπής και απορρόφησης. Ως γνωστό αν περάσει λευκό φως μέσα από ένα αέριο, το αέριο απορροφάει ορισμένες συχνότητες που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες διεγέρσεις-αποδιεγέρσεις των ηλεκτρονίων από κάποια επιτρεπτή στάθμη σε κάποια άλλη. Στη δική μας περίπτωση πρέπει να βρούμε μία αποδιέγερση που να αντιστοιχεί σε συχνότητα της τάξης των μικροκυμάτων περίπου 10GHz και να είναι αρκετά καθαρή, δηλαδή η ενεργειακή στάθμη να μην έχει πάχος ώστε ο συντονισμός να είναι οξύς και έτσι να έχουμε μικρό

σφάλμα μέτρηση. Το πιο κατάλληλο υλικό για αυτή τη δουλειά βρέθηκε να είναι οι ατμοί του Cs 133. Το άτομο αυτό έχει ένα ηλεκτρόνιο στην εξωτερική του στοιβάδα το οποίο μπορεί να διεγερθεί αλλάζοντας το spin του με συχνότητα μικροκυμάτων. Τη συχνότητα αυτή της διεγερσης-αποδιέγερσης ορίστηκε αυθαίρετα στα 9.192.631.770 Hz ώστε να υπάρχει συμβατότητα προς τα πίσω. Δηλαδή η τιμή του  $s$  που προσδιορίζεται με αυτή τη μέθοδο να είναι η ίδια με αυτή που προσδιορίζεται με προηγούμενες μεθόδους. Έτσι βομβαρδίζουμε με η/μ ακτινοβολία από τη γεννήτριά μας τους ατμούς του Cs 133 και μετράμε από την άλλη μεριά την ένταση της ακτινοβολίας. Στην συχνότητα που έχουμε τη μεγαλύτερη απορρόφηση ( μαύρη γραμμή στο φάσμα απορρόφησης) της δίνουμε την τιμή 9.192.631.770 Hz . Με αυτό τον τρόπο συγχρονίζουμε – καλιμπράρουμε το ρολόι μας. Αυτό που περιγράψαμε είναι στην ουσία ένα ρολόι Κεσίου.

Τη συχνότητα που παράγεται από το ρολόι Κεσίου στη συνέχεια, την εκπέμπουμε σε όλο τον πλανήτη ώστε να βοηθήσουμε να συγχρονιστούν και εργαστήρια που δεν διαθέτουν ρολόι Κεσίου. Στην πραγματικότητα η διαδικασία είναι πιο πολύπλοκη, αλλά η βασική φιλοσοφία είναι αυτή που περιγράψαμε.

Με αυτή την τεχνική ορίζουμε το 1s ως τη χρονική διάρκεια 9.192.631.770 περιόδων της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην μετάβαση δύο υπέρλεπτων ενεργειακών σταθμών της κατάστασης ελάχιστης ενέργειας του ατόμου του καϊσίου-133 ( $^{133}\text{Cs}$ ) σε θερμοκρασία 0 K.





*Ένα ρολόι Καισίου*

### **Πως ορίζουμε το μέτρο;**

Όπως και στο χρόνο έτσι και στο μέτρο το πρόβλημα είναι διπλό. Πρώτον η εύρεση του τρόπου να μετράμε πολύ μικρά μήκη και δεύτερον η εύρεση του τρόπου του συγχρονισμού -καλιμπράρισματος των οργάνων ώστε όλα τα όργανά μας να δείχνουν την ίδια τιμή για το μήκος του ίδιου αντικειμένου.

Και τα δύο προβλήματα λύθηκαν στη τη γενική συνέλευση μέτρων και σταθμών του 1960. Σε αυτήν ως μέτρο ορίστηκε το μήκος που είναι ίσο με 1,650,763.73 φορές το μήκος κύματος της πορτοκαλοκόκκινης γραμμής του φάσματος του στοιχείου του 86Κg στο κενό. Η μέθοδος μέτρησης βασίστηκε στη συμβολή των κυμάτων δηλαδή στην ίδια μεθοδολογία που χρησιμοποιείται στο πείραμα Michelson –Morley για τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός.

Αργότερα για να απεξαρτηθεί ο ορισμός του μέτρου από το φάσμα οι επιστήμονες σκέφτηκαν ως εξής: Ως γνωστό η ταχύτητα του φωτός είναι μία παγκόσμια σταθερά και είναι άρρητος αριθμός όπως όλες οι παγκόσμιες σταθερές. Είναι λοιπόν πιο πρακτικό αντί να χρησιμοποιηθεί για τον συγχρονισμό η γραμμή του στοιχείου Κρυπτού, να δοθεί μία συγκεκριμένη τιμή για την ταχύτητα του φωτός με τόση ακρίβεια η οποία μετριέται με τις προηγούμενες μεθόδους και η τιμή αυτή να χρησιμοποιηθεί για τον συγχρονισμό -καλιμπράρισμα. Έτσι ο συγχρονισμός γίνεται πιο εύκολα αφού δεν είμαστε δεσμευμένοι να χρησιμοποιήσουμε μία συγκεκριμένη μέθοδο μέτρησης του μήκους μέσω του στοιχείου Κρυπτόν, αλλά οποιαδήποτε μέθοδο μέτρησης της ταχύτητας του φωτός με κάποια συγκεκριμένη ακρίβεια. Επίσης, αν στο μέλλον θελήσουμε να αυξήσουμε την ακρίβεια των μετρήσεών μας θα αλλάξουμε την τιμή που δώσαμε για την ταχύτητα του φωτός προσθέτοντας και άλλα σημαντικά ψηφία, πετυχαίνοντας έτσι ταυτόχρονα και μεγαλύτερη ακρίβεια και όπως εξηγήσαμε εύκολο καλιμπράρισμα. Τελικά ο πιο πρόσφατος ορισμός του μέτρου διατυπώθηκε το 1983, από την 17η ΓΣΜΣ, ως το μήκος που διανύει το φως στο κενό σε χρόνο  $1/299.792.458$  του δευτερολέπτου.

Συνοψίζοντας λοιπόν, αν ένα εργαστήριο θέλει να ορίσει το μέτρο σύμφωνα με τον κανονισμό του 1983, θα πρέπει να μπορεί να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός με όποιο τρόπο θέλει, αλλά με ακρίβεια ακεραίου. Έστω ότι μετράει την ταχύτητα του φωτός μέσω του δικού του μέτρου και τη βρίσκει 299.792.549. Τέλος διορθώνει το μέτρο και το επαναπροσδιορίζει ως το  $299.792.549/299.792.458$  του δικού του μέτρου.

Την ίδια λογική, να χρησιμοποιήσουμε δηλαδή μια παγκόσμια σταθερά στον ορισμό ενός θεμελιώδους μεγέθους την επεκτείναμε και στα άλλα θεμελιώδη φυσικά μεγέθη ώστε να κάνουμε τον συγχρονισμό μία πιο εύκολη υπόθεση ανεξάρτητη από τη μεθοδολογία του πειράματος. Αυτό έγινε στην τελευταία γενική συνέλευση μέτρων και σταθμών που πραγματοποιήθηκε το 2018. Οι σταθερές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι παρακάτω:

- Η συχνότητα μετάβασης υπέρλεπτης υψής στο άτομο του Καΐσιου  $133 \text{ ΔνCs}$  είναι  $9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$
- η ταχύτητα του φωτός στο κενό  $c$  είναι  $299\,792\,458 \text{ m/s}$
- η σταθερά του Planck  $h$  είναι  $6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$
- το φορτίο του ηλεκτρονίου  $e$  είναι  $1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$
- η σταθερά του Boltzmann  $k$  είναι  $1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
- η σταθερά του Avogadro  $N_A$  είναι  $6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- η φωτεινή απόδοση της έντασης της μονοχρωματικής ακτινοβολίας συχνότητας των  $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ , Kcd, είναι  $683 \text{ lm/W}$

### **Πως ορίζουμε το kg;**

Ο πιο πολύπλοκος ορισμός από τα παραπάνω θεμελιώδη μεγέθη αφορά στο kg. Για τον ορισμό του χρησιμοποιούμε μία διάταξη που λέγεται ζυγός του Watt στην εξελιγμένη του όμως μορφή. Για την ακριβή μέτρηση της τάσης και του ρεύματος χρησιμοποιήθηκε το κβαντικό φαινόμενο Hall και το φαινόμενο Josephson, φαινόμενα στα οποία εμπλέκεται η σταθερά του Planck.

Μία εναλλακτική μέθοδος μέτρησης του kg είναι αυτή μέσω του αριθμού του Avogadro. Για δεκαετίες, μια διεθνής συνεργασία εργάστηκε πάνω σε μια συμπληρωματική στρατηγική για τον καθορισμό του κιλού που περιλαμβάνει τον υπολογισμό του αριθμού των ατόμων σε μια σχεδόν τέλεια σφαίρα αποτελούμενη από άτομα πυριτίου-28. Το έργο αυτό το ανέλαβαν τα 8 παρακάτω ερευνητικά κέντρα. Το PTB στη Γερμανία, το NMIJ στην Ιαπωνία, το NIM στην Κίνα, το METAS στην Ελβετία, το NIST στις ΗΠΑ, το INRiM στην Ιταλία, το BIPM στη Γαλλία και το IRMM στο Βέλγιο. Ο στόχος ήταν ένας ακριβέστερος προσδιορισμός της σταθεράς Avogadro ( $N_A$ ), που συνδέει τον αριθμό των ατόμων ή των μορίων μιας ουσίας με τη μάζα του.

Ξεκινώντας στις αρχές της δεκαετίας του 1990, μία ομάδα από όλα αυτά τα ερευνητικά κέντρα που ονομάστηκε International Avogadro Coordination (IAC) εργάστηκε για να προσδιορίσει αυτόν τον αριθμό με επαρκή ακρίβεια. Αντί για ένα κομμάτι ατόμων άνθρακα-12, χρησιμοποιήθηκε ένας ομοιόμορφος κρύσταλλος πυριτίου-28, διαμορφωμένος προσεκτικά σε σφαίρες με μάζα 1 kg.

Ο σωστός υπολογισμός του αριθμού των ατόμων σε μια σφαίρα διαμέτρου 94 mm απαιτεί εξαιρετικά υλικά. Τελικά κατασκευάστηκαν σφαίρες πυριτίου των οποίων οι επιφάνειες είναι τόσο ομαλές που αν οι σφαίρες αυτές είχαν το μέγεθος της Γης, η μεγαλύτερη



ανωμαλία θα ήταν μόλις 3–5 μέτρα. Αυτές οι μεμονωμένες κρυσταλλικές σφαίρες είναι εξαιρετικά καθαρές και αποτελούνται από 99,9995 τοις εκατό πυρίτιο-28. Αυτή η καθαρότητα απλοποιεί τους υπολογισμούς καταμέτρησης των ατόμων διασφαλίζοντας ότι όλα σχεδόν τα άτομα έχουν ίσες μάζες και η κρυσταλλική δομή της σφαίρας δίνει στα άτομα της ένα προβλέψιμο μοτίβο απόστασης. Συσκευές γνωστές ως οπτικά ιντερφερόμετρα επέτρεψαν στους ερευνητές να μετρήσουν το πλάτος της σφαίρας με ακρίβεια των νανόμετρου, ενώ η τεχνική της κρυσταλλογραφίας ακτίνων Χ παρέχει εικόνες της δομής του κρυστάλλου πυριτίου.

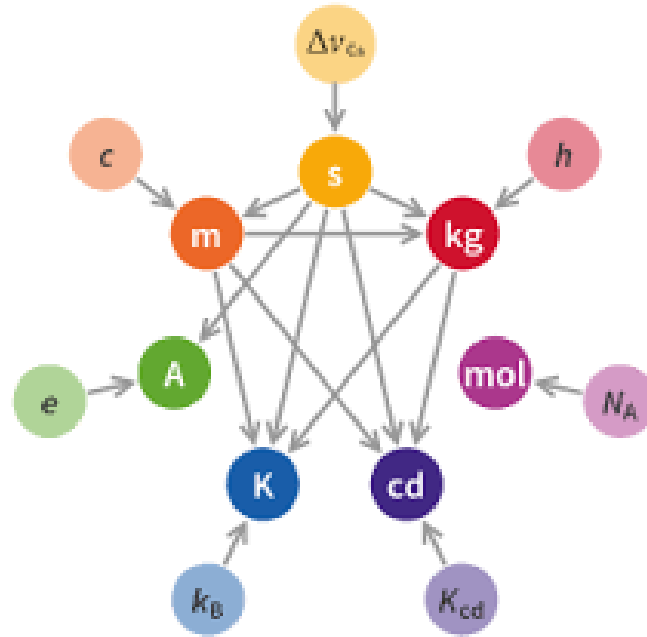
Αυτές οι υπερ-σφαίρες μοιράστηκαν στους επιστήμονες των ερευνητικών κέντρων που είχαν αναλάβει το έργο. Η κάθε σφαίρα που πήρε η ομάδα του κάθε κέντρου, κόστισε περίπου 3,2 εκατομμύρια δολάρια. Η κάθε ομάδα έπρεπε να μετρήσει τον αριθμό των ατόμων του πυριτίου και να βρει τον ίδιο αριθμό. Ο αριθμός αυτός προσδιορίστηκε στην τιμή  $N_A = 6,02214076 \times 10^{23}$



*Το σφαιρικότερο αντικείμενο του πλανήτη*

Οι ορισμοί των 7 θεμελιωδών μονάδων από την συνεδρία του 2018:

Διεθνές Μέγεθος σύμβολο	Ορισμός μονάδας	
Χιλιόγραμμα kg	Μάζα	Το Χιλιόγραμμα ορίζεται θέτοντας την <b>σταθερά Planck</b> $h$ ακριβώς σε $6.62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ( $\text{J} = \text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ ), με βάση τους ορισμούς του μέτρου και του δευτερολέπτου. Έτσι ο τύπος θα γίνει $\text{kg} = h/6.62607015 \cdot 10^{-34} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .
Μέτρο m	Μήκος	Το Μέτρο είναι η απόσταση την οποία διανύει το φως στο κενό σε χρονικό διάστημα ίσο με 1/299.792.458 δευτερόλεπτα.
Δευτερόλεπτο s	Χρόνος	Το Δευτερόλεπτο είναι η χρονική διάρκεια 9.192.631.770 περιόδων της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην μετάβαση δύο υπέρλεπτων ενεργειακών σταθμών της κατάστασης ελάχιστης ενέργειας του ατόμου του καισίου-133 ( $^{133}\text{Cs}$ ) σε θερμοκρασία 0 K.
Αμπέρ A	Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος	Το Αμπέρ είναι $1/1.602176634 \cdot 10^{-19}$ φορές η ροή του στοιχειώδους φορτίου $e$ .
Κέλβιν K	Απόλυτη Θερμοκρασία	Το Κέλβιν ορίζεται θέτοντας την προκαθορισμένη αριθμητική τιμή της <b>σταθεράς Boltzmann</b> $k$ σε $1.380649 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ ( $\text{J} = \text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ ), με βάση τους ορισμούς του χιλιογράμμου, του μέτρου και του δευτερολέπτου.
Μολ mol	Ποσότητα Ουσίας	Το Μολ είναι η ποσότητα μίας ουσίας που περιέχει τόσες στοιχειώδεις οντότητες όσα είναι τα άτομα σε 0,012 χιλιόγραμμα καθαρού άνθρακα-12 ( $^{12}\text{C}$ ).
Καντέλα (Κηρίο) cd	Ένταση Φωτεινότητας	Η Καντέλα είναι η φωτεινή ένταση, σε μία δεδομένη <b>διεύθυνση</b> , μίας πηγής που εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία με συχνότητα $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ και έχει ένταση ακτινοβολίας στην κατεύθυνση αυτή ίση με 1/683 <b>Watt</b> ανά στερακτίνο.



Οι 7 θεμελιώδεις μονάδες και οι εξαρτήσεις τους από παγκόσμιες σταθερές

Αναφορές:

1. [International System of Units - Wikipedia](#)
2. [SI Units | NIST](#)
3. [International System of Units \(SI\) | Units, Facts, & Definition | Britannica](#)
4. [The International System of Units \(SI\) - BIPM](#)
5. [International System of Units \(SI\) | Measurement Library | KEYENCE UK & Ireland](#)