

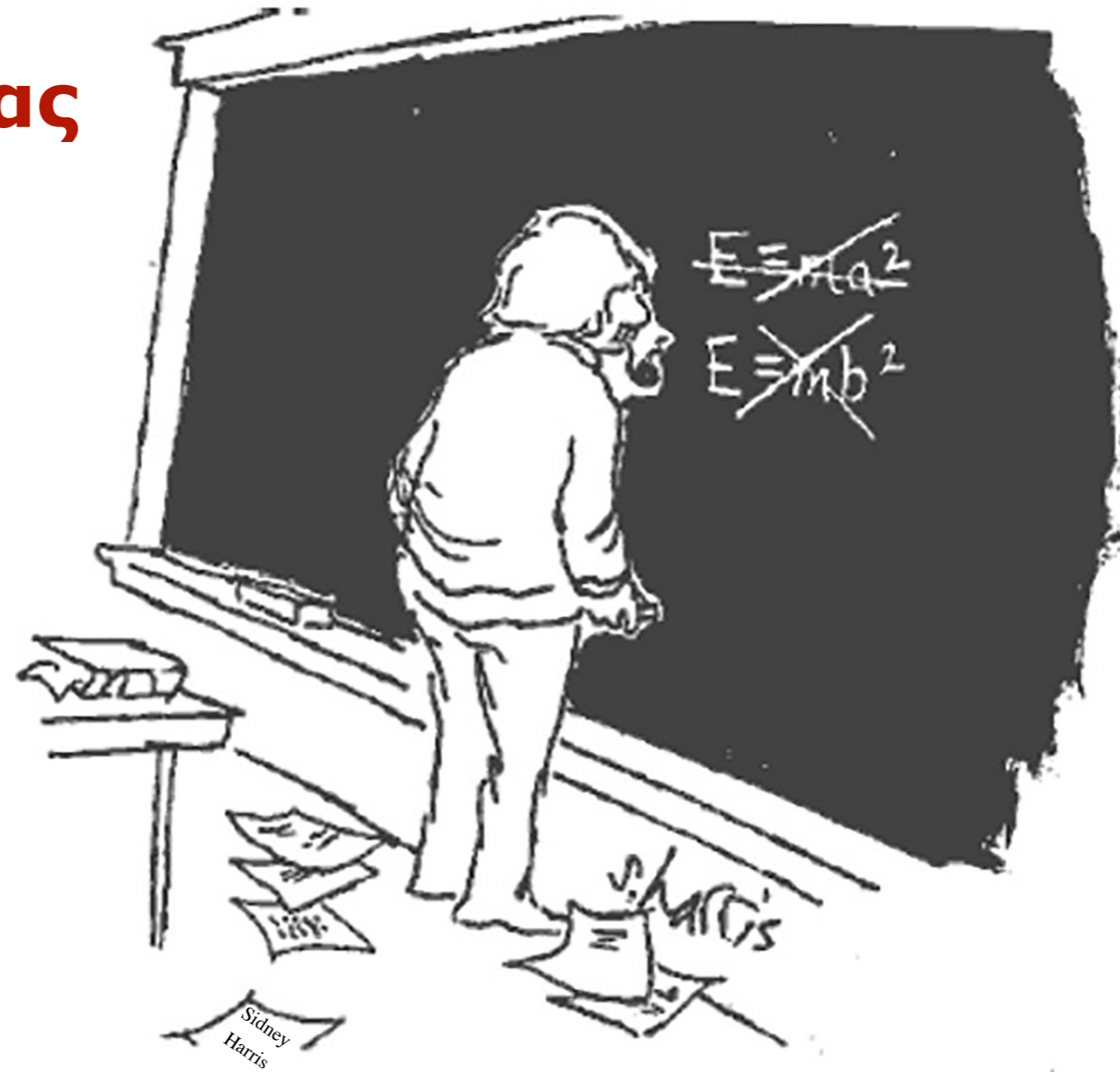
Ειδική Θεωρία Σχετικότητας

5ο εξάμηνο σπουδών

Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Φυσικής
Εθνικό & Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Ακαδημαϊκό Έτος
2024-2025

διαφάνειες διαλέξεων
Κ. Θεοφιλάτου



οργανωτικά θέματα

διδάσκοντες

Ιωάννης Παπαδημητρίου

Κωνσταντίνος Θεοφιλάτος

η-τάξη [η εγγραφή στην η-τάξη είναι υποχρεωτική]

ανακοινώσεις (**ελέγξτε ότι τις λαμβάνεται**)

χειρόγραφες σημειώσεις

διαφάνειες

ασκήσεις, παλαιά θέματα & λύσεις

<https://eclass.uoa.gr/courses/PHYS268/>

ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ

για οποιοδήποτε θέμα που αφορά το μάθημα, παρακαλούμε να **κοινοποιείτε** το μήνυμά σας και στους **δύο** διδάσκοντες του μαθήματος

ktheofi@phys.uoa.gr

ioannis.Papadimitriou@phys.uoa.gr

διαθέσιμα στον Εύδοξος

Θεωρία της Ειδικής Σχετικότητας II

M. Τσαμπαρλής [68401897]

Εισαγωγή στην Ειδική Σχετικότητα

W. Rindler [50659225]

Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας και οι Εφαρμογές της

K. Χριστοδουλίδης [41954963]

Εισαγωγή στην **ηλεκτροδυναμική**

D. J. Griffiths [22691598]

Κλασική **ηλεκτροδυναμική**

Βέργαδος I [50661386]

επιλογές για το
μάθημα της ΕΘΣ

επιλογές για το
μάθημα της
ηλεκτροδυναμικής

συμβάσεις

δυστυχώς τα περισσότερα βιβλία της ΕΘΣ έχουν διαφορετικές συμβάσεις οι οποίες είναι μεταξύ τους ασυνεπείς

αυτό δημιουργεί σύγχυση στον συμβολισμό* και όχι μόνο**

θα επισημαίνω τις διαφορετικές συμβάσεις κατά την διάρκεια του μαθήματος ώστε να μπορείτε στο τέλος να διαβάσετε οποιοδήποτε βιβλίο σας αρέσει

* πχ ο *David Griffiths* χρησιμοποιεί διαφορετική μετρική, ανάλογα με το βιβλίο που γράφει, άλλη στον H/M , άλλη στα στοιχειώδη σωμάτια

** ως μάζα m εμείς στο μαθημα θα αναφερόμαστε πάντα και μόνο στην αναλλοίωτη μάζα του κάθε σωματιδίου (particle data group)

υλικό στο διαδίκτυο

σελίδα Θεοχάρη Αποστολάτου

<http://users.uoa.gr/~thapostol/SPREL/index.html>

*σημειώσεις και πολλές ασκήσεις από παλιά διαγωνίσματα,
(συμβατές με τις συμβάσεις του μαθήματος)

ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΟΣ

Θ. Χριστοδουλάκης

Ε. Κορφιάτης

σημειώσεις

[Θ. Χριστοδουλάκης & Ε. Κορφιάτης](#)

(συμβατές με τις συμβάσεις
του μαθήματος)



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΑΘΗΝΑ 2015

Ιστορική εισαγωγή

η σχετικότητα

υπήρχε από την εποχή του **Γαλιλαίου 1632**, οι νόμοι της **μηχανικής** είναι οι ίδιοι για όλους τους αδρανειακούς παρατηρητές = η μορφή των εξισώσεων δεν αλλάζει κάτω από μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου

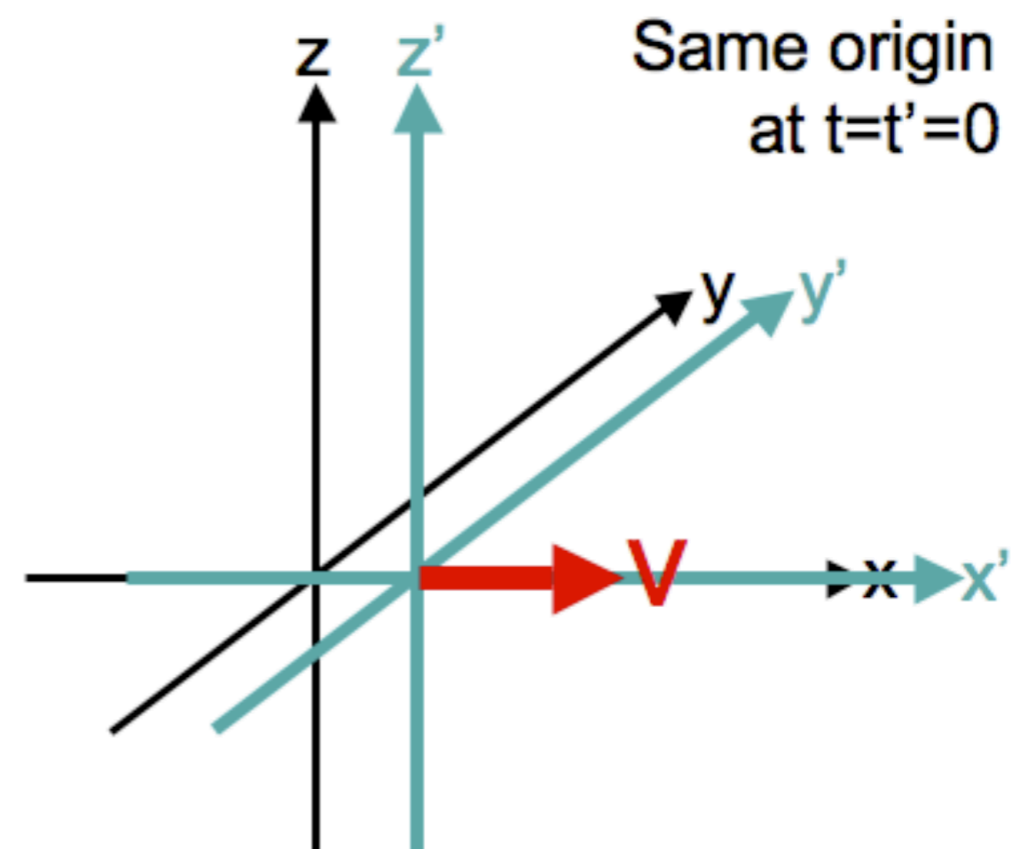
μετασχηματισμός Γαλιλαίου

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t.$$



Galilean transformation

απόλυτος χρόνος

Maxwell 1861

ΣΤΟ ΚΕΝΌ

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= 0, & \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0, & \nabla \times \mathbf{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= 0.\end{aligned}$$

↓ (δείτε **Φυσική III** ή D. Griffiths)

$$\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{E} = 0$$

$$\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{B} = 0$$

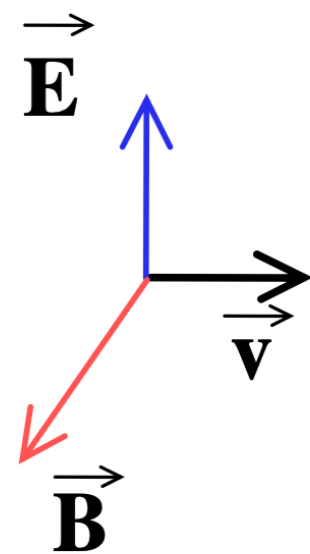
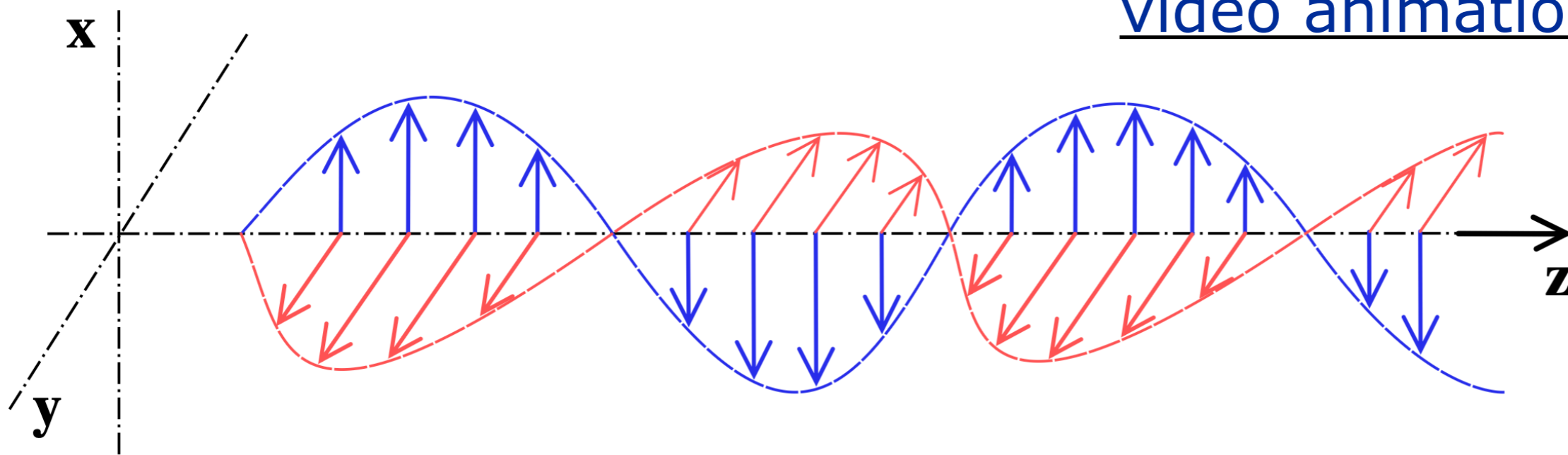
ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΛΥΣΗ

Ορίζοντας ως $c = (\mu_0 \epsilon_0)^{-1/2}$ παίρνουμε:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{E} = 0$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{B} = 0$$

[video animation](#)



υπολογισμός ταχύτητας

```
[6]: import math
ε0 = 8.854187817e-12 # Permittivity of free space (F/m)
μ0 = 4 * math.pi * 1e-7 # Permeability of free space (H/m)
c = 1 / math.sqrt(ε0 * μ0)
print(c) # Speed of light in m/s
```



299792458.0105029

τα μ_0 και ϵ_0 δεν είχαν (φαινομενικά) τίποτα κοινό με το φως

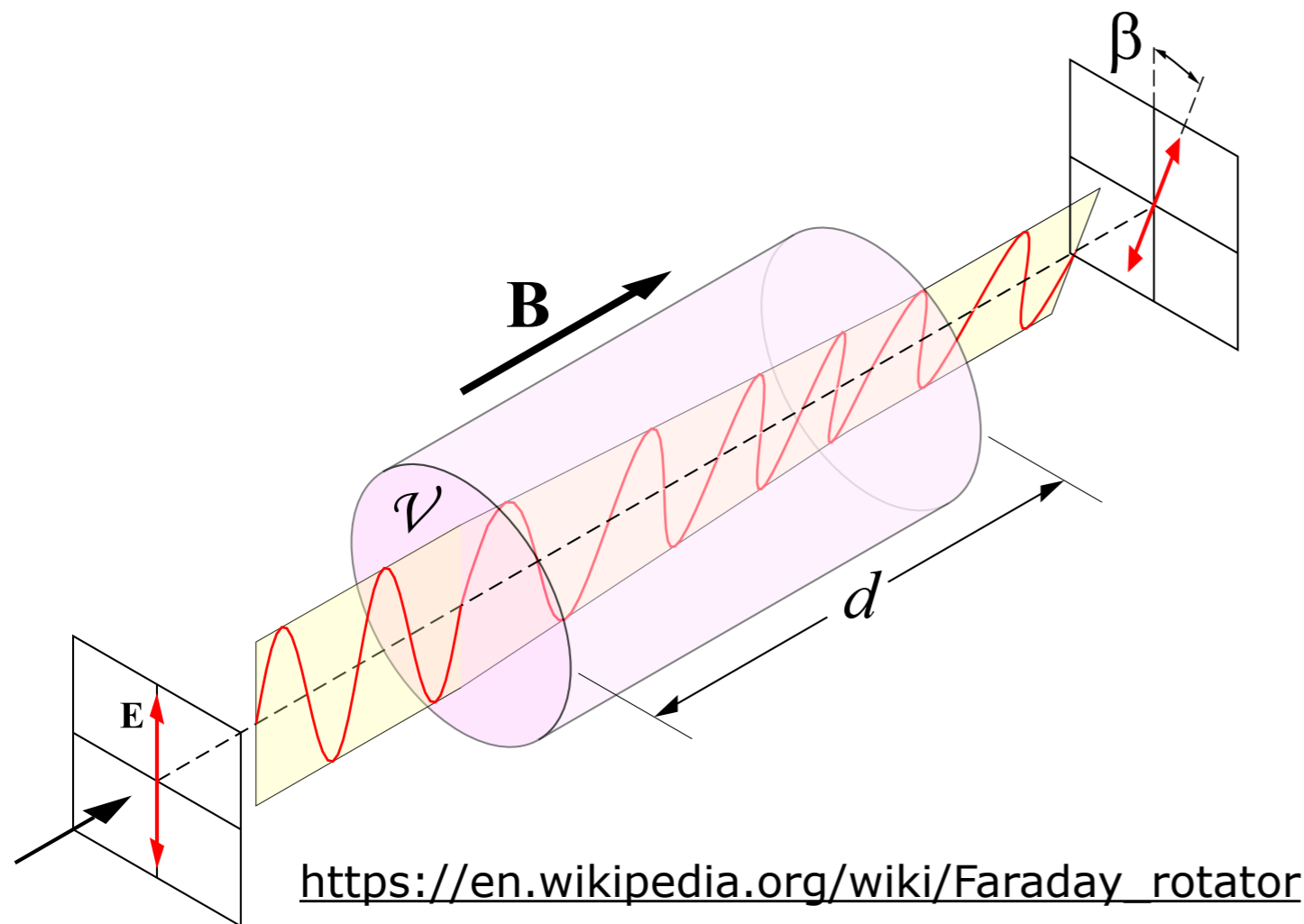
$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad \frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}$$

ο Maxwell παρατήρησε ότι η αριθμητική τιμή του c είναι συμβατή, στα όρια της τότε πειραματικής ακρίβειας, με την ταχύτητα του φωτός όπως αυτή είχε μετρηθεί ανεξάρτητα σε οπτικές παρατηρήσεις (**Romer** 1676, **Brandley** 1728, **Fizeau** 1849, **Foucault** 1850 ...)

Φως = Η/Μ κύματα

Μετά βίας μπορούμε να αποφύγουμε το συμπέρασμα ότι το φως συνίσταται στους εγκάρσιους κυματισμούς του ίδιου μέσου που είναι η αιτία ηλεκτρικών και μαγνητικών φαινομένων

— τάδε ἔφη **Maxwell 1861**

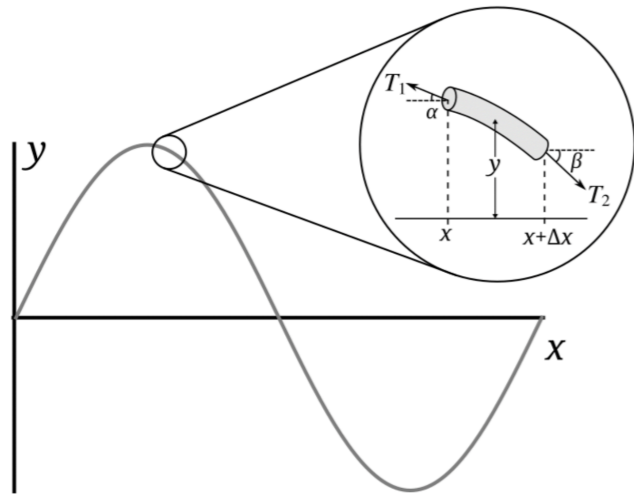


https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_rotator

Η αριθμητική σύμπτωση των ταχυτήτων δεν είναι από μόνη της μόνη της ικανή για να αποφανθούμε ότι η φύση φωτός είναι Η/Μ. Ο Maxwell ήξερε ότι το φως "στρίβει" όταν περνά μέσα από Β-πεδία και άρα αλληλεπιδρά με αυτά

μηχανικά κύματα

Η ταχύτητα διάδοσης ενός κύματος σε μια χορδή (u) είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της **δύναμης της τάσης της χορδής (T)** και αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της **γραμμικής πυκνότητας (μ)** της χορδής:



$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Αιθέρας ονομάστηκε το υποθετικό μέσο διάδοσης των Η/Μ κυμάτων, την ύπαρξη του οποίου ουδέποτε επιβεβαιώσαμε μέχρι τώρα σε αλληπάλληλα πειράματα

ΤΟ ΥΠΟΘΕΤΙΚΟ ΜΈΣΟ ΤΟΥ ΑΙΘΈΡΑ

θα πρέπει να έχει ασυνήθιστες ιδιότητες λόγω της υψηλής ταχύτητας του φωτός και της **απουσίας τριβής** κατά τη διάβαση υλικών σωμάτων. Μέσω της ανάλυσης της ταχύτητας **επιστροφής** του φωτός σε διάφορες κατευθύνσεις και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, μπορεί να μετρηθεί η κίνηση της Γης σε σχέση με τον αιθέρα η αναμενόμενη σχετική διαφορά $\Delta c/c$ είναι πολύ μικρή.

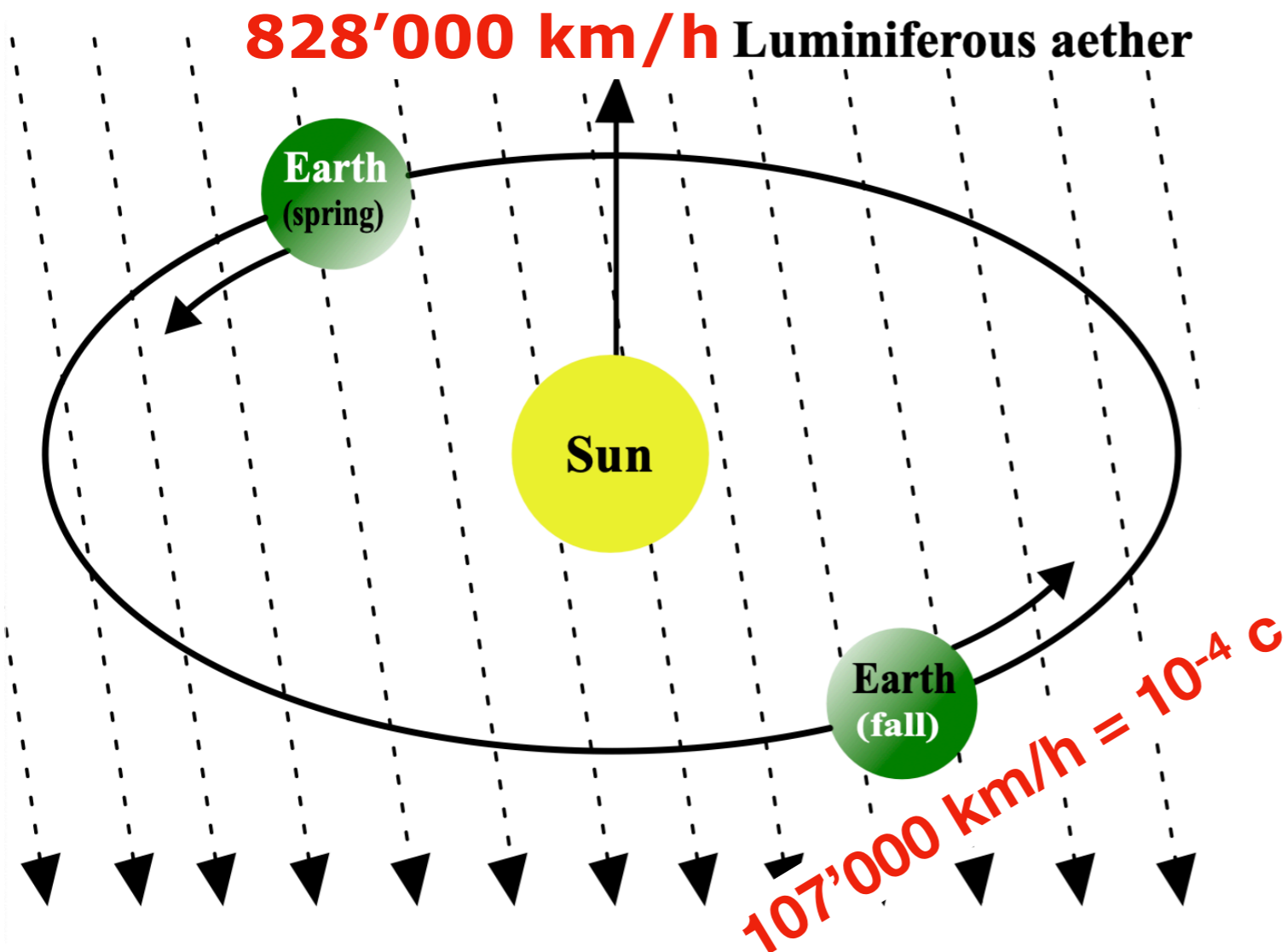


figure from:

https://en.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley_experiment

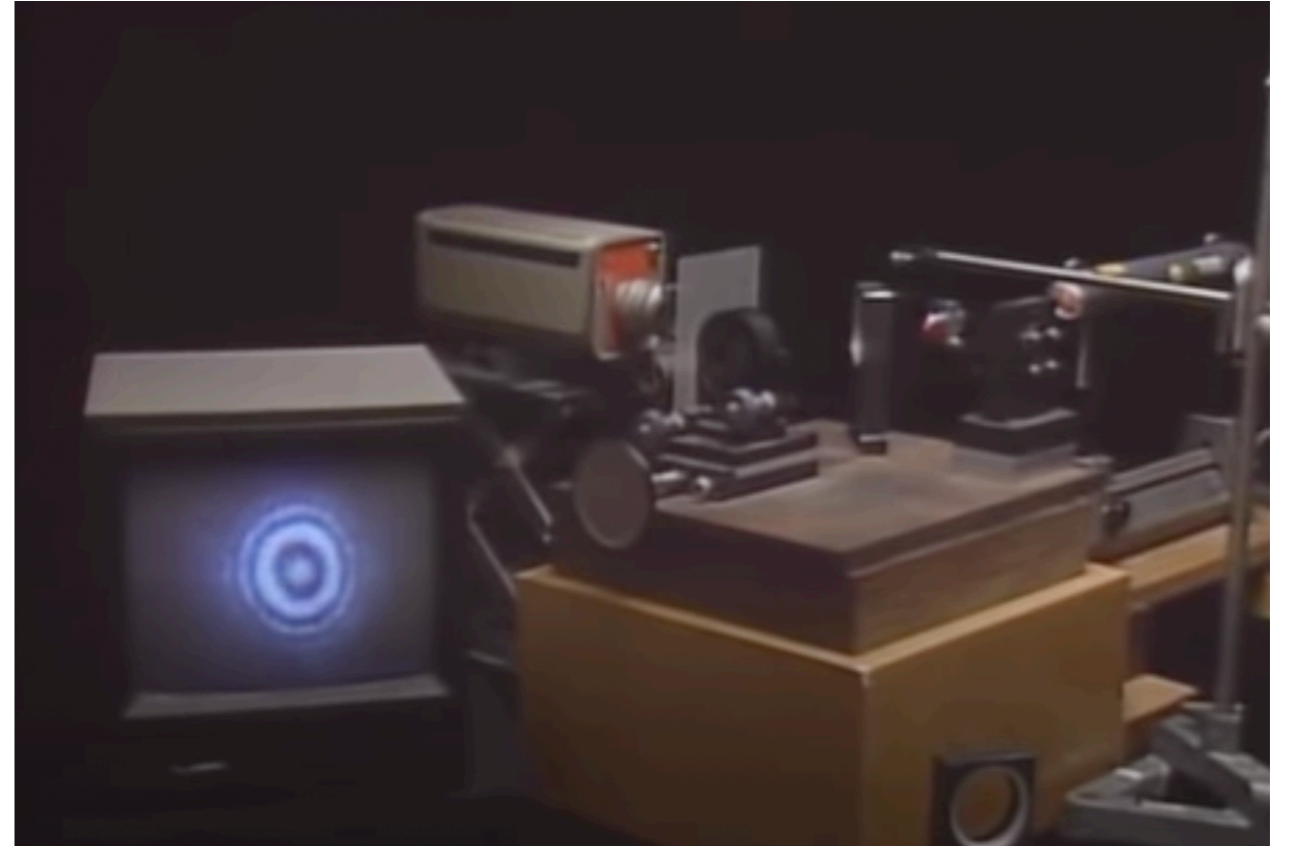
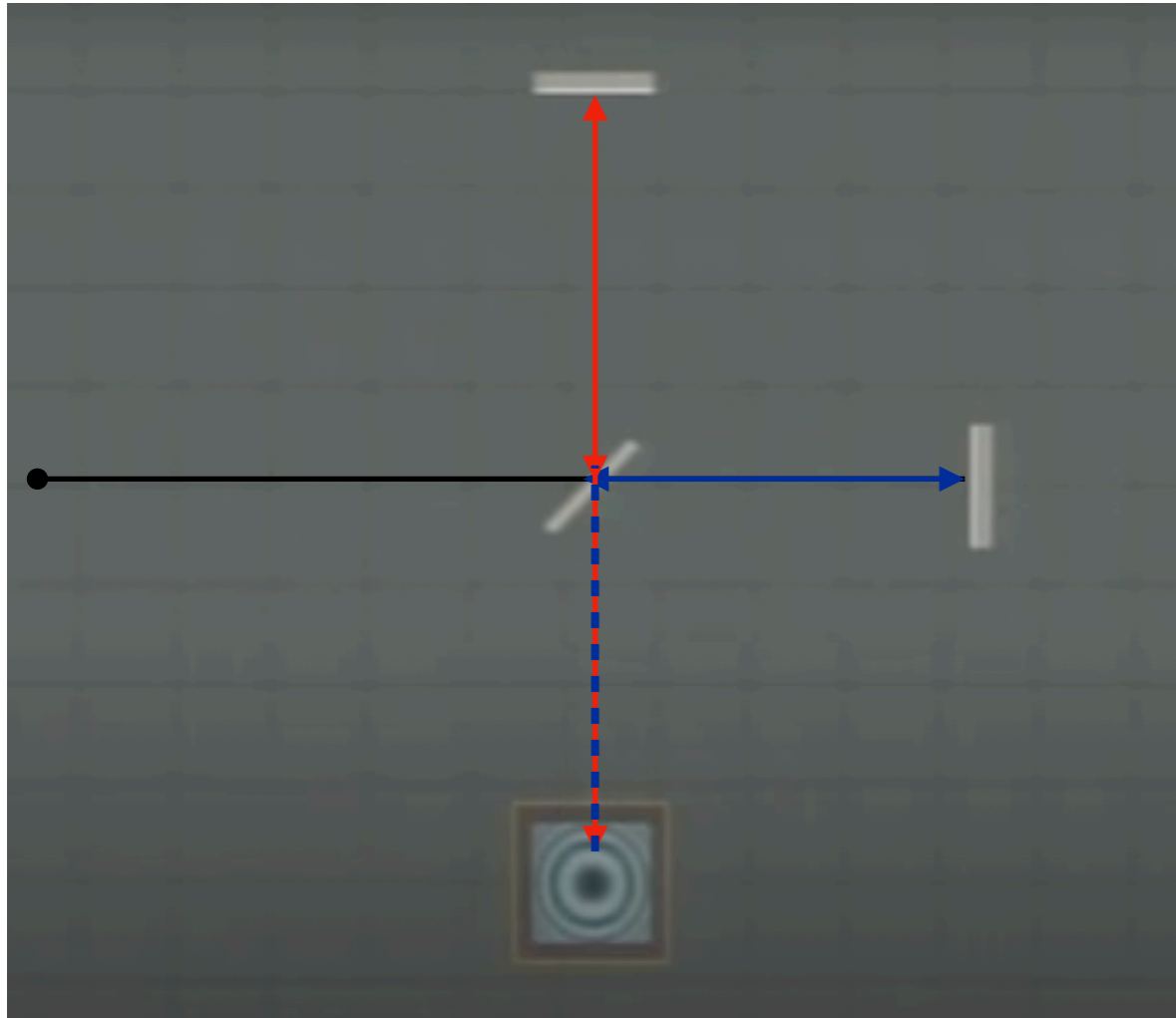
η ύπαρξη αιθέρα

είναι ασύμβατη με την ισοδυναμία όλων των αδρανιακών συστημάτων (αρχή σχετικότητας) για την H/M θεωρία

υπάρχει προνομιούχο σύστημα στο οποίο η διαφορική εξίσωση κίνησης (κυματική) είναι σε απλή μορφή και είναι σε ηρεμία ως προς το μέσο διάδοσης (τον υποθετικό αιθέρα)

Η θεωρία του Einstein ήρθε να "διασώσει" την αρχή της σχετικότητας ώστε αυτή να ισχύει όχι μόνο για την Μηχανική αλλά και για τον H/M και όλες τις γνωστές αλληλιπεδράσεις. (Παρότι η ΕΘΣ ανακαλύφθηκε με την μελέτη του φωτός, στην πραγματικότητα είναι μια θεωρία του χώρου και του χρόνου και όχι του φωτός.)

michelson morley



video animation

+ πολλά άλλα πειράματα που εξέταζαν και το ενδεχόμενο "συμπαράσυρσης του αιθέρα" (ether drag)

**η ταχύτητα του
φωτός σήμερα**

ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

ορίζεται ως $c = 299'792'458 \text{ m/s}$ χωρίς καμία απολύτως πειραματική αβεβαιότητα!

$c =$ παγκόσμια σταθερά

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$$

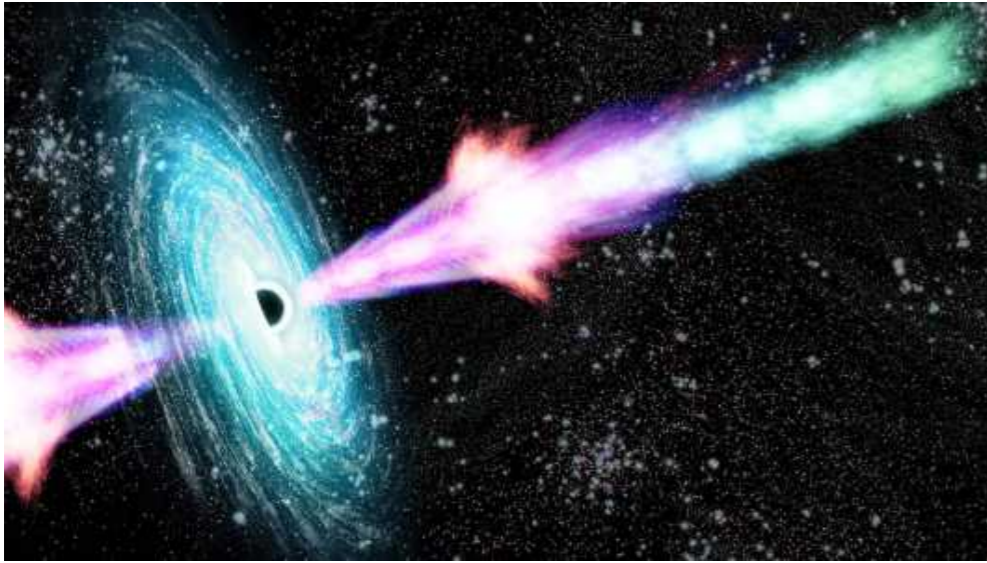
$$\mu_0 = 1.25663706127(\mathbf{20}) \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$$

$$1 \text{ m} = (299'792'458)^{-1} \text{ s}$$

Το 1s ορίζεται με ατομικά ρολόγια καισίου, με αβεβαιότητα της τάξεως 1s κάθε 3 εκατομμύρια χρόνια!

όλα τα χρώματα

“τρέχουν” με την ίδια ταχύτητα;



πειραματικά ελέγχουμε πιθανή εξάρτηση της ταχύτητας του φωτός από την συχνότητά του. Καμία εξάρτηση δεν έχει ως τώρα βρεθεί <https://arxiv.org/abs/0908.1832>

μονάδες

η αριθμητική τιμή της ταχύτητας του φωτός εξαρτάται από το σύστημα μονάδων

$$c = \mathbf{299'792'458} \text{ m/s} \approx \mathbf{3*10^8} \text{ m/s}$$

$$c = \mathbf{670'616'629} \text{ miles / hour}$$

$$c = \mathbf{1} \text{ light-sec / sec}$$

θα δουλέψουμε σε σύστημα μονάδων όπου **c = 1 αδιάστατο** (= καθαρός αριθμός) καθώς αυτό απλοποιεί σημαντικά την γραφή και θα επανερχόμαστε στο SI όταν χρειάζεται

δηλαδή το μήκος θα έχει τις ίδιες μονάδες με τον χρόνο & καμία ταχύτητα δεν θα είναι ανώτερη της μονάδας

$$L = 1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s} \rightarrow c*10^{-9}\text{s} = 0.3 \text{ m} \approx 30 \text{ cm}$$

$$u = 0.1 \rightarrow c*0.1 \approx 10^7 \text{ m/s}$$

αξιώματα ΕΘΣ

- α) ισοδυναμία όλων των αδρανειακών συστημάτων
- β) ανώτατο όριο ταχύτητας ($c = 1$)

βάσει των παραπάνω 2 αξιωμάτων (και μόνο) θα ξεδιπλώσουμε ολόκληρη την ΕΘΣ !

— δεν χρειαζόμαστε καμία άλλη υπόθεση —

κάποια βιβλία "ξεκινούν" θεωρώντας δεδομένη την ύπαρξη αναλλοίωτου διαστήματος ($\Delta s^2 = -\Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$) το οποίο χρησιμοποιούν για την εξαγωγή των μετασχηματισμών Lorentz • εμείς απλά θα ξεκινήσουμε από τα α) + β) χωρίς αυτήν την έξτρα υπόθεση, την οποία θα εξάγουμε ως συνέπεια των α) + β)