

# **ΕΙΔΙΚΗ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ**

**Νίκος Κανδεράκης**

# Η Φυσική πριν τον Einstein

# Απόλυτος χρόνος και χώρος στη Νευτώνεια Φυσική

## Χρόνος

«Ο απόλυτος, αληθής και μαθηματικός χρόνος, από την ίδια του τη φύση, ρέει ομοιόμορφα χωρίς να επηρεάζεται από οτιδήποτε εξωτερικό ...» (Newton: “Principia Mathematica”)

**Ερμηνεία:** Στο υπόβαθρο των φαινομένων υπάρχει παντού ένα σταθερό τικ-τακ που καθορίζει τη ροή του χρόνου.

**Leibniz:** σχεσιακός προσδιορισμός του χρόνου

Τα γεγονότα (οι αλλαγές) και οι σχέσεις τους προσδιορίζουν το χρόνο.

## Χώρος

«Ο αληθής χώρος, από την ίδια του τη φύση, χωρίς να επηρεάζεται από οτιδήποτε εξωτερικό, παραμένει πάντοτε όμοιος και ακίνητος.» (Newton: “Principia Mathematica”)

## Αρχή σχετικότητας του Γαλιλαίου

«Διάλογος για τα δύο μεγάλα συστήματα του κόσμου» 1632

Για να πεισθούν οι αριστοτελικοί για την κίνηση της Γης

Αν κλεισθείς στο αμπάρι ενός караβιού,  
δεν μπορείς να διαπιστώσεις αν το καράβι κινείται ή όχι.

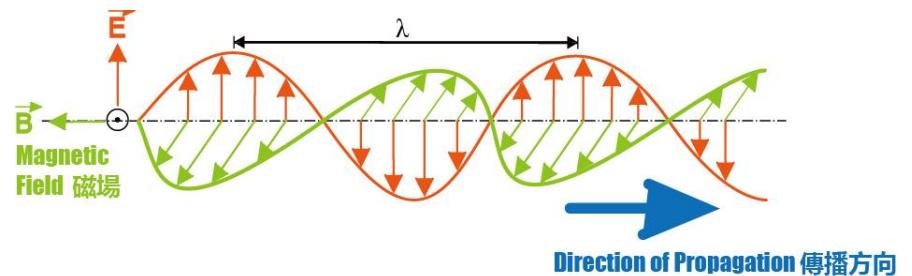
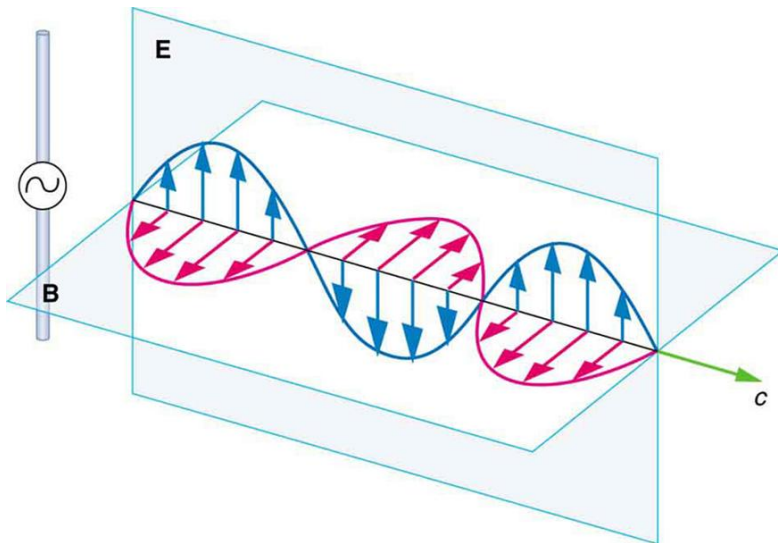
Η κίνηση της Γης δεν επηρεάζει τις κινήσεις πάνω στη Γη και δεν μπορεί να ανιχνευθεί με παρατηρήσεις ή πειράματα.

# Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

James Clerk Maxwell τέλη 19<sup>ου</sup> αιώνα

Μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο → μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο → μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο κ.ο.κ  
ηλεκτρικό κύμα → μαγνητικό κύμα → ηλεκτρικό κύμα κ.ο.κ.

## Ηλεκτρομαγνητικό κύμα



## Ηλεκτρομαγνητικά κύματα (συνέχεια)

Από ΗΜ εξισώσεις (εξισώσεις Maxwell) προκύπτει  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

**Συμπέρασμα:** το φως είναι ΗΜ κύμα

Μέσο διάδοσης: αιθέρας – ακίνητος

**Απόλυτο σύστημα αναφοράς;**

Αντιφατικές ιδιότητες του αιθέρα

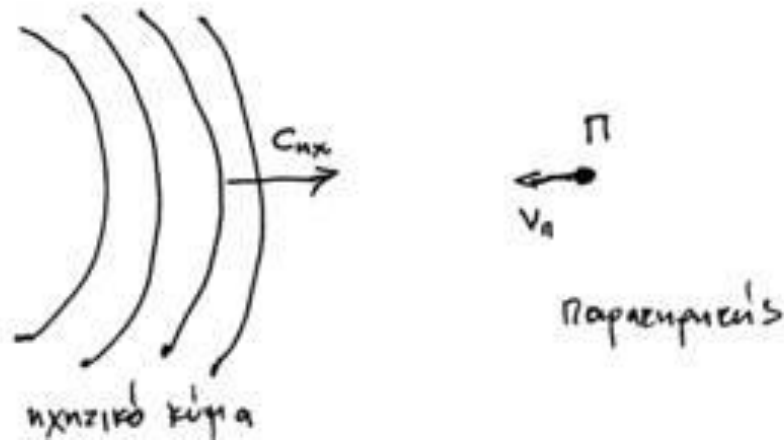
- **Ανεπαίσθητος**
- **Πολύ μεγάλη σκληρότητα**

**Από τι εξαρτάται η ταχύτητα του φωτός (και των ΗΜ κυμάτων);**

**Εξαρτάται από την ταχύτητα του παρατηρητή;**

**Στον ήχο**

$$V_{ολ.} = c_{ηχ.} + v_{παρ.}$$



**Στο φως;**

$$V_{ολ.} = c_{\phi\omega\tau.} + v_{παρ.} ; ;$$

# Πείραμα Michelson

Maxwell 1879 : σχέδιο για να μετρηθεί η ταχύτητα της Γης ως προς τον αιθέρα - απόδειξη ύπαρξης του αιθέρα

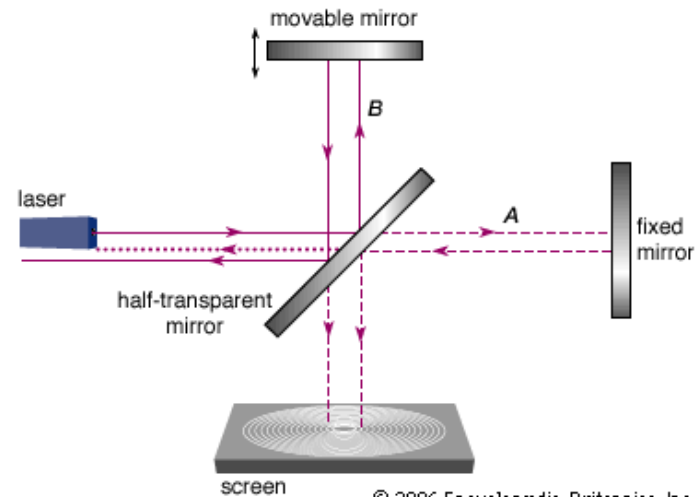
τροχιακή ταχύτητα της Γης = 30.000m/s

Μέτρηση ταχύτητας φωτός στη διεύθυνση της κίνησης

Μέτρηση ταχύτητας φωτός κάθετα στη διεύθυνση της κίνησης

Πείραμα Michelson 1881

Συμβολόμετρο Michelson



Αποτέλεσμα: η ταχύτητα του φωτός δεν επηρεάζεται από την ταχύτητα της Γης (του παρατηρητή)

$$V_{ολ.} \neq c_{φωτ.} + V_{παρ.}$$



# Ειδική Σχετικότητα του Einstein

## **Albert Einstein**

**Υπάλληλος στο γραφείο ευρεσιτεχνιών της Βέρνης από 1903  
Απομονωμένος από την ακαδημαϊκή κοινότητα**

**Μάλλον δεν ήξερε για το πείραμα Michelson**

**Ευρωπαϊκό πρόβλημα με το συγχρονισμό των ρολογιών στα  
τραίνα και τους σταθμούς**

**«Περί της ηλεκτροδυναμικής των κινούμενων σωμάτων» 1905**

# Νοητικό πείραμα του νεαρού Einstein

Τι θα δεις αν τρέχεις μαζί με το φως; (ταχύτητα  $c$ )

Παγωμένο ΗΜ κύμα

Δεν μπορεί να υπάρχει

Ασυμβατότητα Μηχανικής – Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας

10 χρόνια προβληματισμού → πρέπει να αλλάξει η Μηχανική

**Δεδομένο:** η ταχύτητα του φωτός είναι πάντοτε η ίδια, άσχετα πως κινείσαι

Δε θα δεις παγωμένο ΗΜ κύμα.

# Δύο θεμελιώδεις αρχές

1<sup>η</sup> αρχή: **Αρχή της σχετικότητας**

**Κλασική αρχή σχετικότητας (Γαλιλαίου):** οι **νόμοι της μηχανικής** είναι οι ίδιοι για όλους τους παρατηρητές σε ομοιόμορφη κίνηση

**Αρχή σχετικότητας του Einstein:** όλοι οι **νόμοι της φυσικής** είναι οι ίδιοι για όλους τους παρατηρητές σε ομοιόμορφη κίνηση

Μέσα σε ένα κινούμενο σύστημα είναι αδύνατο να βρεις αν κινείσαι (και με πόση ταχύτητα) ή είσαι ακίνητος.

## 2<sup>η</sup> αρχή: Σταθερότητα της ταχύτητας του φωτός

Το φώς κινείται σε ελεύθερο χώρο με ταχύτητα  $c$  που είναι ανεξάρτητη από την κίνηση της πηγής ή του παρατηρητή.

πειραματική επικύρωση : διάσπαση ουδέτερων πιονίων ( $\pi^0$ )

Τα  $\pi^0$  παράγονται από κάποιες πυρηνικές αντιδράσεις

Έχουν ταχύτητα  $v = 0,9988c$

Διασπώνται γρήγορα σε δύο φωτόνια  $\gamma$  ( $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ )

Σύμφωνα με την κλασική φυσική, τα φωτόνια έπρεπε να έχουν ταχύτητα

$$0,9988c + c \approx 2c$$

Βρέθηκε ότι έχουν ταχύτητα  $c$ .

**Ο αιώρας πετάγεται στα σκουπίδια**

**Ο αιώρας είναι περιττός**

**Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο κενό**

## Οι δύο αρχές συνδέονται μεταξύ τους

Π.χ. δύο διαστημόπλοια και φωτεινή πηγή

Το ένα κινούμενο με ταχύτητα  $v$ .

Το άλλο ακίνητο

Αν το κινούμενο διαστημόπλοιο μετρούσε για το φως ταχύτητα  $c + v$ , θα παραβίαζε την αρχή της σχετικότητας (**γιατί;**)

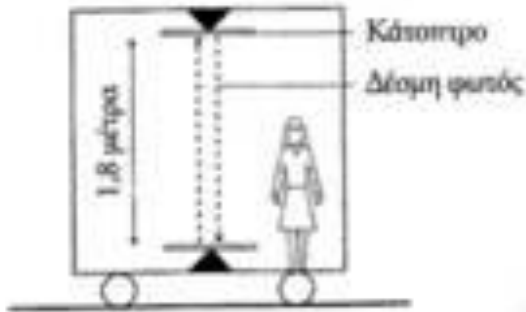
**Επομένως**, ταχύτητα φωτός πάντα  $c$   
(σταθερή)



# Διαστολή του χρόνου

Παρατηρήσεις μέσα στο τρένο

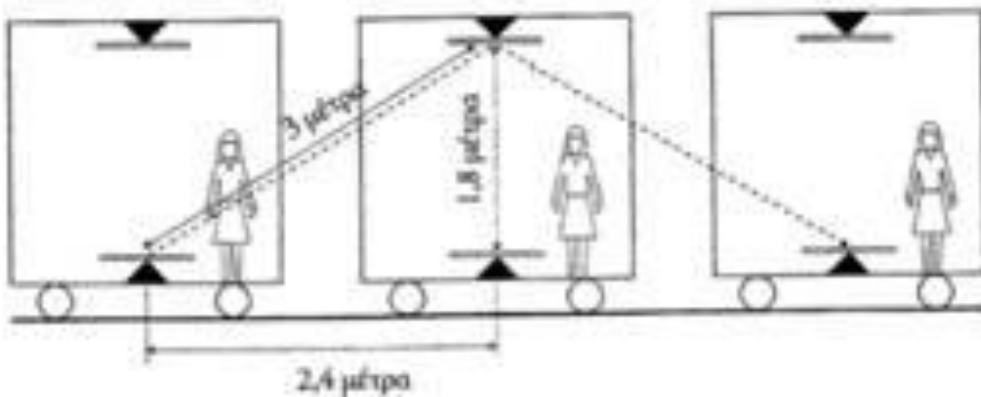
80% της ταχύτητας του φωτός



$$t_0 \text{ και } l_0 = ct_0$$

Παρατηρήσεις έξω από το τρένο

80% της ταχύτητας του φωτός



$$t \text{ και } l = ct$$



## Υπολογισμός διαστολής χρόνου

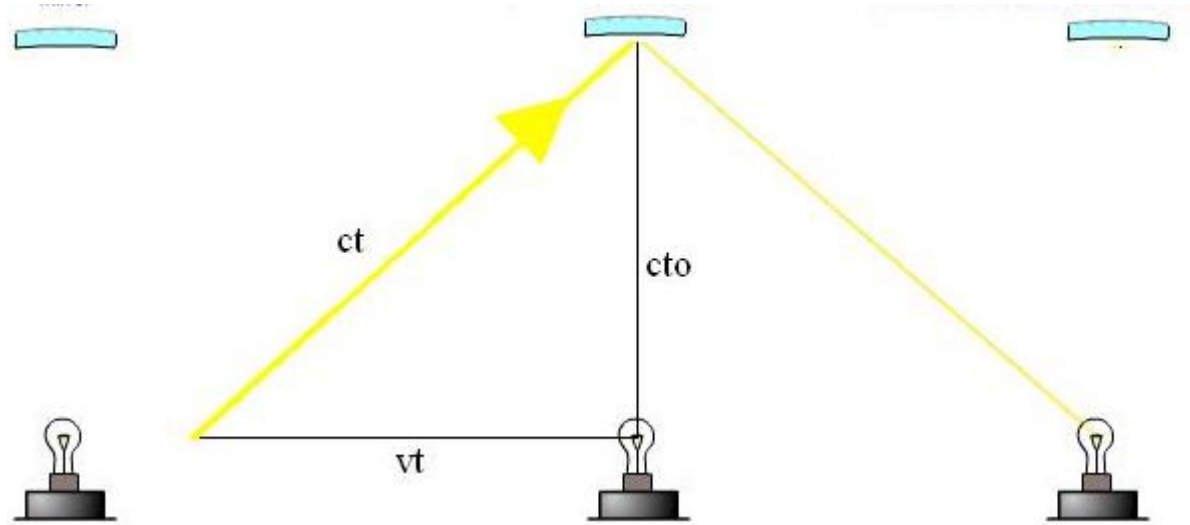
$$(ct)^2 = (ct_0)^2 + (vt)^2$$

$$c^2 t^2 = c^2 t_0^2 + v^2 t^2$$

$$c^2 t^2 - v^2 t^2 = c^2 t_0^2$$

$$(c^2 - v^2) t^2 = c^2 t_0^2$$

$$t^2 = c^2 t_0^2 / (c^2 - v^2)$$



$$t^2 = \frac{t_0^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \rightarrow$$

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \mathbf{t > t_0}$$

## Εμπειρική επικύρωση

Μιόνια ( $\mu$ ): υποατομικά σωματίδια  
ασταθή: διασπώνται σε ηλεκτρόνια ( $e$ ) και νεutrίνο ( $\nu$ )  
μέσος χρόνος ζωής: 2,2 $\mu$ s

CERN 1976 δέσμη μιονίων στο μεγάλο δακτύλιο  
με ταχύτητα  $v = 0,9994c$

Έπρεπε να ζήσουν για 14 γύρους

Έκαναν 400 γύρους

**Γιατί;**

Ο χρόνος ζωής τους αυξήθηκε για μας 29 φορές

## Εμπειρική επικύρωση

Ατομικά ρολόγια : έδαφος - αεροπλάνο

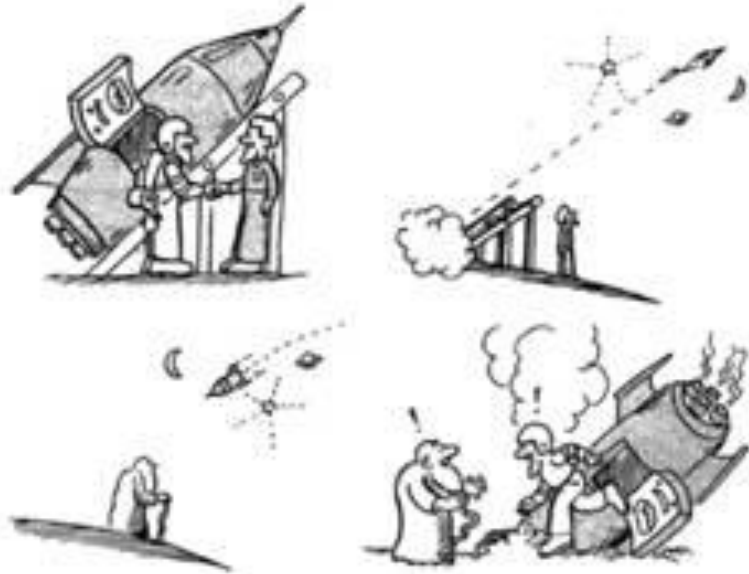
USA 1971

Ένα ακίνητο στο U.S. Naval Observatory

Ένα πάνω σε αεροπλάνο – κάνει το γύρω του κόσμου ταξιδεύοντας δυτικά

Το ακίνητο ρολόι έδειξε 273ns περισσότερο χρόνο από το κινούμενο ρολόι

## Παράδοξο των διδύμων



### Εφαρμογή

Κινούμενος παρατηρητής  $t_0 = 10$  έτη

$v = 0,8c$

$C = 3 \cdot 10^8$  m/s

Ακίνητος παρατηρητής  $t = ;$

## Ταυτόχρονα γεγονότα

Δύο γεγονότα πολύ κοντά στο χώρο

Π.χ. αρχή και τέλος ενός φαινομένου – δύο ενδείξεις ρολογιού

Τα ταυτόχρονα γεγονότα βρίσκονται στην καρδιά της μέτρησης του χρόνου

Δύο γεγονότα πολύ μακριά στο χώρο

Π.χ. αναλαμπή στον Ήλιο όταν το ρολόι δείχνει 2 και 15

**Είναι ταυτόχρονα;**

Η αναλαμπή έγινε πριν από 8,3 λεπτά

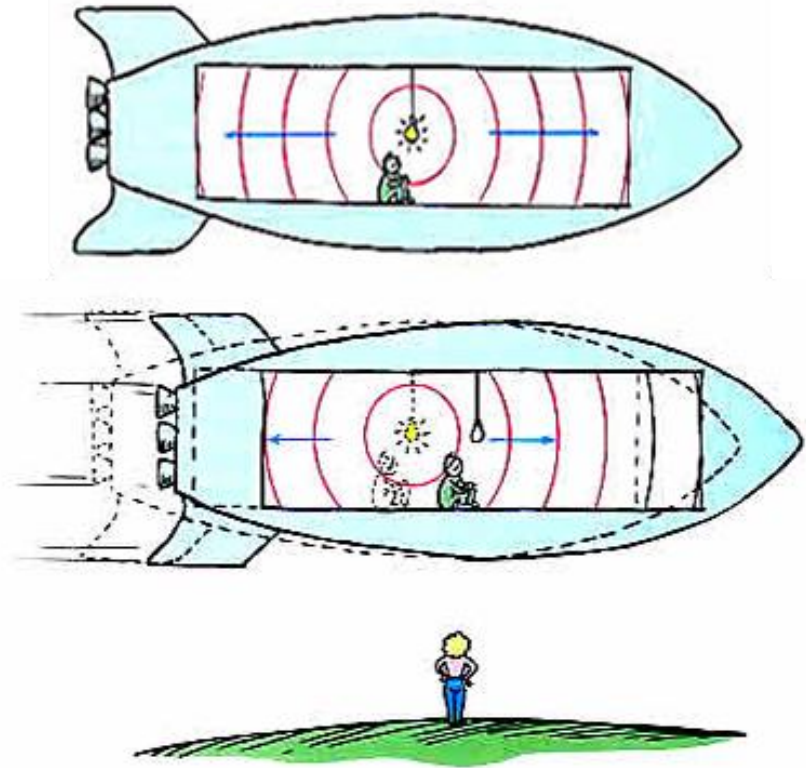
## Κινούμενος και ακίνητος παρατηρητής

**Ακίνητος παρατηρητής:** το φως  
φθάνει στα δύο τοιχώματα  
ταυτόχρονα

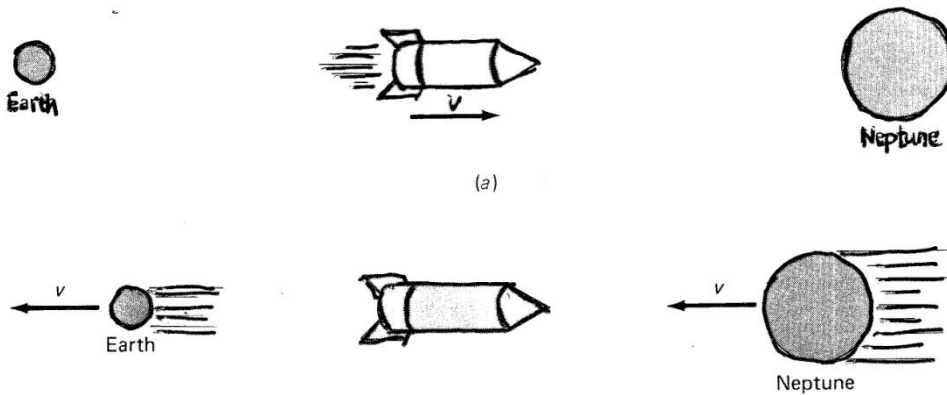
**Κινούμενος παρατηρητής:** το φως  
φθάνει πρώτα στο πίσω τοίχωμα

**Τα γεγονότα δεν είναι ταυτόχρονα  
για τους δύο παρατηρητές**

**Τα ταυτόχρονα γεγονότα βρίσκονται στην καρδιά της μέτρησης του  
μήκους - ταυτόχρονη παρατήρηση αρχής και τέλους**



# Συστολή του μήκους



- i. Ακίνητος παρατηρητής – Γη  
απόσταση Γης – Ποσειδώνα:  $l$   
χρόνος ταξιδιού:  $t$

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- ii. Κινούμενος παρατηρητής  
χρόνος ταξιδιού:  $t_0$  και απόσταση  $l_0$

$$l_0 = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

## Συστολή του μήκους

$l$  = μήκος για τον ακίνητο παρατηρητή

$l_o$  = μήκος για τον κινούμενο παρατηρητή

$$l_o = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$l_o < l$$



Η διαστολή του χρόνου και η συστολή του μήκους μετριοούνται σε διαφορετικά συστήματα αναφοράς

- Διαστολή του χρόνου για τον ακίνητο παρατηρητή
- Συστολή του μήκους για τον κινούμενο παρατηρητή

## Εφαρμογή

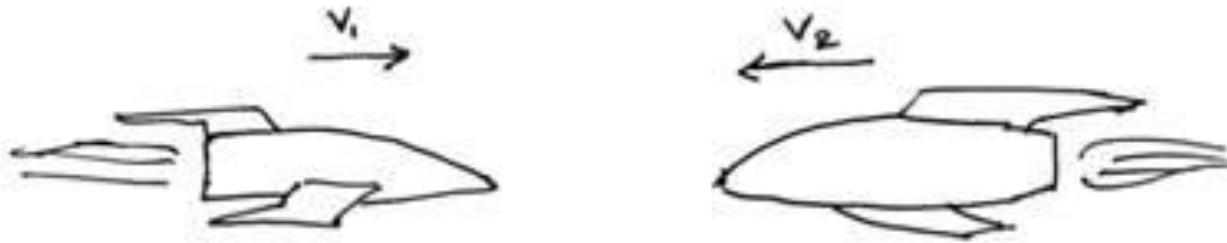
Διαστημόπλοιο διανύει  $l = 10.000.000\text{m}$

(για τον ακίνητο παρατηρητή στη Γη)

Με ταχύτητα  $v = 0,8c$

Πόση απόσταση  $l_0$  μετρούν ότι διένυσαν οι  
αστροναύτες (κινούμενοι παρατηρητές);

## Πρόσθεση ταχυτήτων



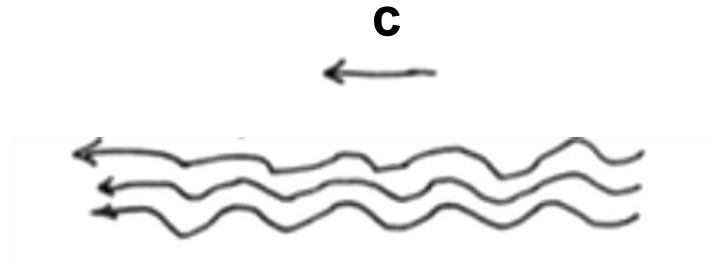
## Σχετική ταχύτητα

Νευτώνεια μηχανική  $v = v_1 + v_2$

Σχετικότητα

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c^2}}$$

## Εφαρμογή



Πόση είναι η σχετική ταχύτητα του διαστημοπλοίου σε σχέση με το φως;

Νευτώνεια μηχανική:  $v = c + c = 2c$

Σχετικότητα  $v =$  ;

# Η δυναμική της σχετικότητας

## Ορμή

Η ορμή στη σχετικότητα πρέπει να ικανοποιεί τις εξής συνθήκες:

- Πρέπει να διατηρείται σταθερή σε όλα τα συστήματα που κινούνται ομοιόμορφα (αρχή της σχετικότητας).
- Πρέπει να είναι συμβατή με τις (κινηματικές) εξισώσεις της σχετικότητας.
- Πρέπει να προσεγγίζει την τιμή  $m \cdot v$  όταν  $v \ll c$

Η εξίσωση που ικανοποιεί τις συνθήκες αυτές είναι η

$$p = \frac{m \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

**Πόση θα είναι η ορμή αν  $v = c$ ;**

Αν  $v = c$ , τότε  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \rightarrow 0$  και  $p \rightarrow$  άπειρο - **αδύνατον**

**Συμπέρασμα:** κανένα υλικό σώμα (που έχει μάζα) δεν μπορεί να κινείται με την ταχύτητα του φωτός

Η ταχύτητα του φωτός είναι η μεγαλύτερη ταχύτητα στο σύμπαν

## **Δύναμη**

Η δύναμη στη σχετικότητα προσδιορίζεται όπως και στη  
νευτώνεια μηχανική

$$**F = \Delta p / \Delta t**$$

## Κινητική ενέργεια

Η κινητική ενέργεια στη σχετικότητα, όπως και στη νευτώνεια μηχανική, υπολογίζεται με το έργο των δυνάμεων

$$K = W = F \cdot \Delta x = (\Delta p / \Delta t) \cdot \Delta x$$

και τελικά προκύπτει

$$K = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m c^2$$

Αν  $v \ll c$  καταλήγει στο γνωστό  $K = \frac{1}{2} m v^2$

## Ολική ενέργεια

$mc^2$  : δεν εξαρτάται από την ταχύτητα - **ενέργεια ηρεμίας**

$\frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$  : άθροισμα **κινητικής ενέργειας** και **ενέργειας ηρεμίας** –  
ολική ενέργεια

$$E_{ολ} = K + mc^2$$

## Ενέργεια ηρεμίας

$$E = mc^2$$

Ισοδυναμία μάζας - ενέργειας

Αν εξαϋλωθεί μια μάζα **m** θα δώσει ενέργεια  **$E = mc^2$**

**Αυτό συμβαίνει στην ατομική βόμβα**



## Εφαρμογή

Πόση ενέργεια παράγεται αν εξαϋλωθεί 1kg μάζας;  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s.

Όταν εκραγεί 1kg TNT δίνει ενέργεια  $5 \cdot 10^6$  J.

Με πόσους τόνους TNT ισοδυναμεί η προηγούμενη ενέργεια;

$$m = 1\text{kg}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

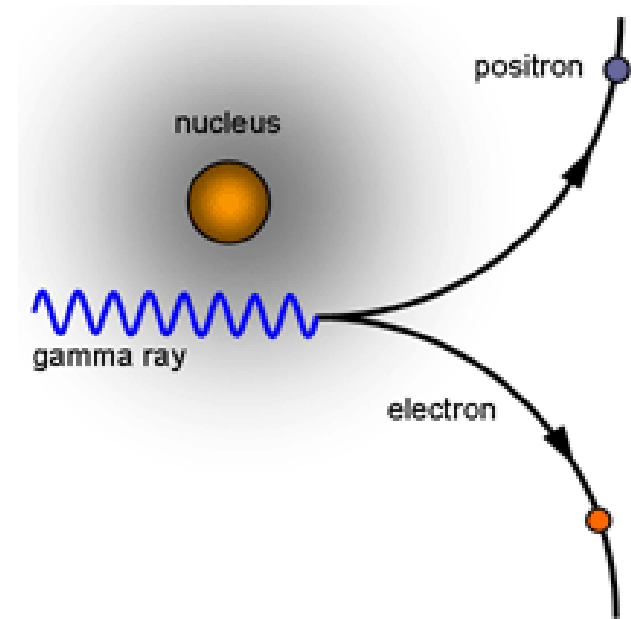
$$E = ;$$

## Δίδυμη γένεση

Φωτόνιο  $\gamma$  (μεγάλης ενέργειας)  
κοντά σε βαρείς πυρήνες

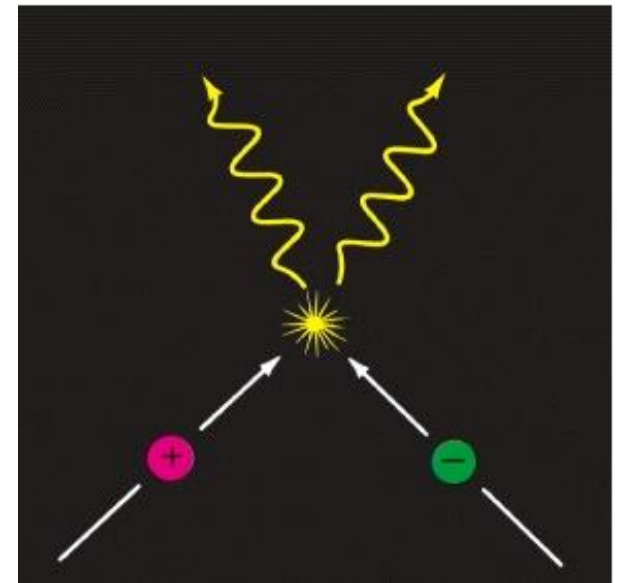
Διασπάται σε ηλεκτρόνιο ( $e^-$ ) και  
ποζιτρόνιο ( $e^+$ )

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+$$

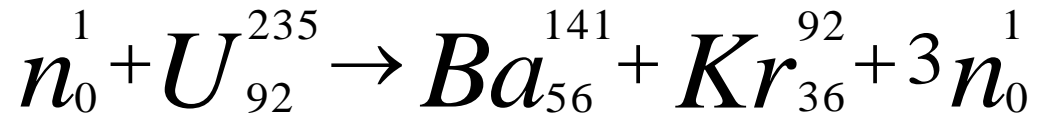


## Εξαΰλωση σωματιδίου – αντισωματιδίου

Πρωτόνιο + αντιπρωτόνιο  $\rightarrow$   
ακτινοβολία  $\gamma$



## Σχάση ουρανίου

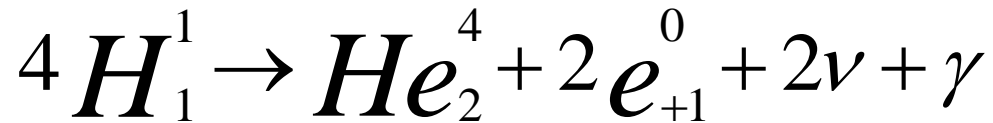


**νετρόνιο + Ουράνιο → Βάριο + Κρυπτόν + 3 νετρόνια + Ενέργεια**

**Η ενέργεια προκύπτει από ελάττωση μάζας**

**περίπου 0,1% της μάζας**

## Σύντηξη υδρογόνου



4 πυρήνες υδρογόνου → πυρήνας ηλίου + 2 ποζιτρόνια +  
2 νετρίνα + φωτόνιο  $\gamma$  + Ενέργεια

Η ενέργεια προκύπτει από ελάττωση της μάζας

περίπου 0,6% της μάζας