

# Οι θεωρίες του Αϊνστάιν για τον χώρο και τον χρόνο

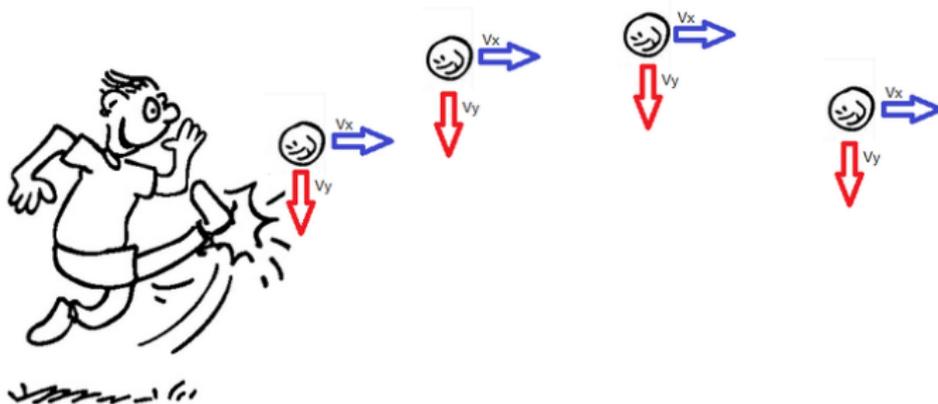
**Παναγιώτα Καντή**

Τομέας Θεωρητικής Φυσικής, Τμήμα Φυσικής,  
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Θερινό Σχολείο Φυσικής  
Γιαννιτσά, 1 Ιουλίου 2014

## Η Νευτώνια Μηχανική

Η θεωρία της Φυσικής που αναπτύχθηκε από τον Γαλιλαίο και τον Νεύτωνα για να περιγράψει την κίνηση των σωμάτων μέσα στον χώρο, όπως στην περίπτωση μιας βολής

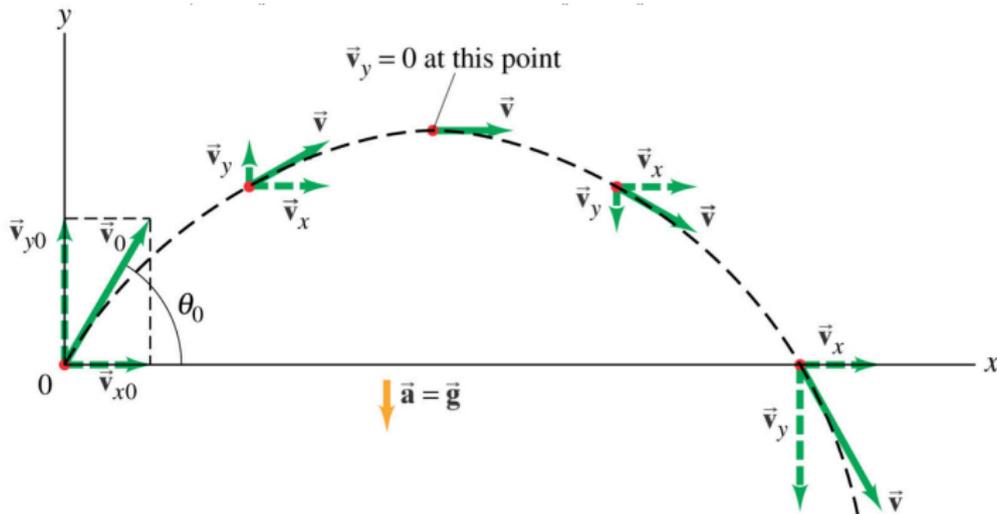


χρησιμοποιεί ως “βοηθητική” παράμετρο τον χρόνο για να ορίσει ποσότητες όπως η ταχύτητα και η επιτάχυνση του σώματος

# Η Νευτώνια Μηχανική

Έτσι, μπορούμε να γράψουμε:

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}, \quad \text{και} \quad a_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}, \quad a_y = \frac{\Delta v_y}{\Delta t}$$



## Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

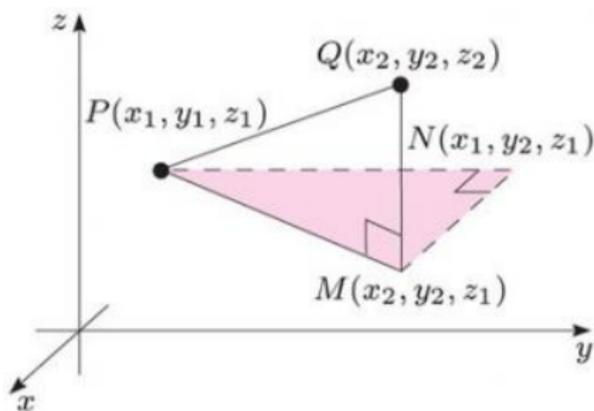
- Διατυπώθηκε από τον Αλβέρτο Αϊνστάιν (Albert Einstein) σε ένα επιστημονικό του άρθρο το 1905



- Η βασική της ιδέα είναι ότι ο χώρος και ο χρόνος αποτελούν δύο διάκριτα, ισοδύναμα κομμάτια ενός ενιαίου υποβάθρου, του χωρόχρονου, μέσα στο οποίο λαμβάνουν χώρα όλα τα γεγονότα

## Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

Μια από τις βασικότερες έννοιες του συνηθισμένου χώρου είναι αυτή της απόστασης μεταξύ δύο σημείων  $P$  και  $Q$ :



Με διπλή εφαρμογή του Πυθαγορείου Θεωρήματος, βρίσκουμε

$$(\Delta s)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2$$

## Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

Ας υποθέσουμε, όμως, ότι στα σημεία  $P$  και  $Q$  έλαβαν χώρα δύο γεγονότα, τις χρονικές στιγμές  $t_1$  και  $t_2$  αντίστοιχα

Τότε σύμφωνα με την Ε.Θ.Σ., η ‘απόσταση’ ανάμεσα στα δύο γεγονότα μέσα στον χωρόχρονο ορίζεται ως εξής

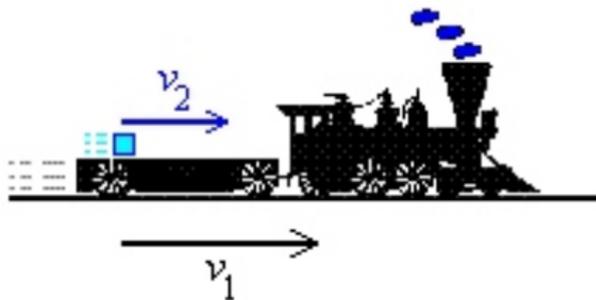
$$(\Delta s)^2 = -c^2(\Delta t)^2 + (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2$$

με τη διαφορά προσήμου να υπάρχει ώστε να διακρίνει την χρονική από τις χωρικές συντεταγμένες

Όλες οι συντεταγμένες, χρονικές και χωρικές, εμφανίζονται πλέον με ισοδύναμο τρόπο σε όλες τις εξισώσεις της Ε.Θ.Σ.

## Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

Μια επίσης συνηθισμένη διαδικασία στη Νευτώνια Μηχανική είναι αυτή της πρόσθεσης των ταχυτήτων



Ένας ακίνητος παρατηρητής στο έδαφος μετράει την τελική ταχύτητα του κιβωτίου να είναι

$$v = v_1 + v_2$$

## Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

Η Ε.Θ.Σ. αντίθετα μας λέει ότι η τελική ταχύτητα δίνεται από την σχέση:

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

όπου  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό, και θέτει ως αξίωμα ότι δεν υπάρχει μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτή στη φύση

Αν ένα διαστημόπλοιο κινείται με  $v_1 = 0.5c$  και εκπέμπει μια φωτεινή ακτίνα με  $v_2 = c$  προς την κατεύθυνση ενός παρατηρητή, τότε αυτός θα μετρήσει τελική ταχύτητα για την φωτεινή ακτίνα

$$v_T = \frac{0.5c + c}{1 + (0.5c)(c)/c^2} = c \quad (!!!)$$

## Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

Η ταχύτητα του φωτός είναι σταθερή και ανεξάρτητη από την κίνηση είτε της πηγής είτε του παρατηρητή

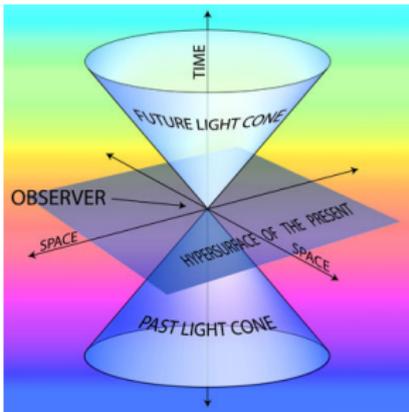


Δεν μπορούμε ποτέ να φτάσουμε μια φωτεινή ακτίνα - αν μπορούσαμε να το κάνουμε αυτό, η φωτεινή ακτίνα θα στεκότανε ακίνητη δίπλα μας. Μια φωτεινή ακτίνα όμως δεν σταματά ποτέ...



# Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

Επειδή  $\tan \phi = v/c \leq 1$ , μόνο η περιοχή με  $\phi \leq \pi/4$  είναι επιτρεπτή

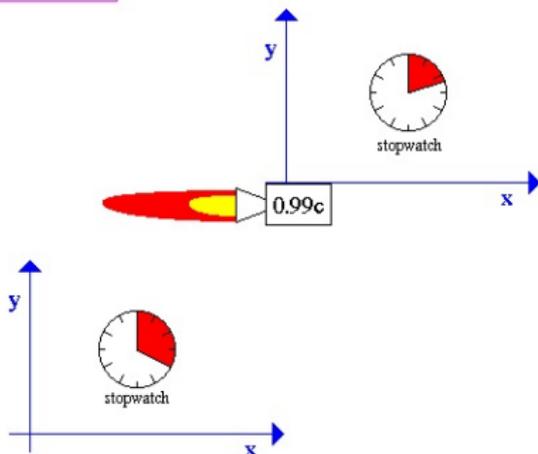


Άρα, κάθε γεγονός (η κοινή κορυφή των δύο κώνων) έχει ένα παρελθόν (κάτω κώνος) και ένα μέλλον (επάνω κώνος)

# Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

Η Ε.Θ.Σ. προβλέπει δύο πολύ ενδιαφέροντα φαινόμενα: το πρώτο είναι η διαστολή του χρόνου

Time Dilation



clocks run slower as one approaches the speed of light

Ένα κινούμενο ρολόι πηγαίνει πιο αργά από ένα ακίνητο ρολόι!



## Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

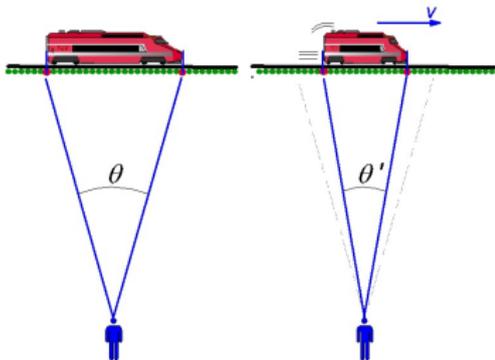
Το φαινόμενο της διαστολής του χρόνου έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά επανηλειμμένως:

- Το 1971, οι Hafele και Keating έκαναν τον γύρο της Γης με αεροπλάνο έχοντας μαζί τους δύο ατομικά ρολόγια. Στο τέλος του ταξιδιού τους, οι ενδείξεις των ρολογιών τους διέφεραν από αυτές των ακίνητων τόσο ακριβώς όσο προέβλεπε η Ε.Θ.Σ.
- Το φαινόμενο επιβεβαιώνεται καθημερινά σε πειράματα στοιχειωδών σωματιδίων: ένα γρήγορα κινούμενο σωματίδιο ζει περισσότερο από ένα ίδιο ακίνητο μια που το 'εσωτερικό' του ρολόι πηγαίνει πιο αργά (π.χ. το σωματίδιο του μιονίου, όταν κινείται, ζει περισσότερο από το αναμενόμενο 0.0000015 sec)



# Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

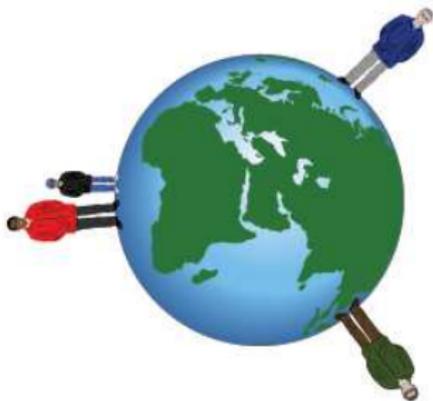
Η πειραματική επιβεβαίωση του φαινομένου αυτού είναι πιο δύσκολη



Έμμεση επιβεβαίωση: κατά την διάρκεια συγκρούσεων βαριών ιόντων, η πυκνότητά τους φαίνεται να είναι μεγαλύτερη κατά την κατεύθυνση της κίνησής τους παρά κατά την εγκάρσια

# Η Νευτώνια Βαρύτητα

Η βαρυτική δύναμη είναι ανύπαρκτη στο επίπεδο των στοιχειωδών σωματιδίων αλλά κυρίαρχη στον μακρόκοσμο



Είναι η δύναμη που μας κρατά δέσμιους στην επιφάνεια της Γης αλλά και τους πλανήτες σε τροχιές γύρω από τον Ήλιο

## Η Νευτώνια Βαρύτητα

Η μαθηματική θεωρία που περιγράφει την βαρυτική δύναμη αναπτύχθηκε από τον Ισαάκ Νεύτωνα (1686) – ο παγκόσμιος νόμος της βαρύτητας έχει την μορφή:

$$F = G_N \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

όπου  $G_N$  η βαρυτική σταθερά,  $M_1$  και  $M_2$  οι μάζες των δύο σωμάτων,  $r$  η μεταξύ τους απόσταση, και  $F$  η μεταξύ τους ελκτική δύναμη



**Did you know?** Sir Isaac Newton was born on January 4, 1643. He was a leader of the scientific revolution of the 17th century. Newton was a physicist and mathematician who laid the foundations of calculus. He studied planetary motion and is famous for discovering the law of gravity.





## Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Η θεωρία του Νεύτωνα δεν ήταν επομένως όσο ακριβής θα θέλαμε ειδικά σε περιοχές έντονου βαρυτικού πεδίου

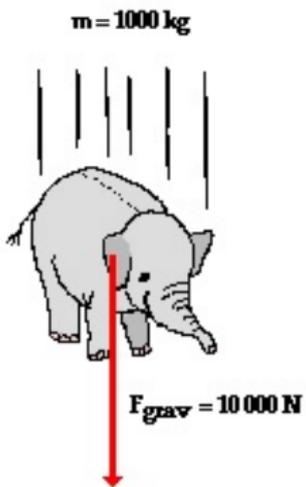
Ποιος όμως θα μπορούσε να φτιάξει μια καινούρια θεωρία για τη βαρύτητα η οποία δεν θα ακύρωνε αυτή του Νεύτωνα αλλά θα την βελτίωνε;

Το 1915 ο Αλβέρτος Αϊνστάιν διατύπωσε την Γενική Θεωρία της Σχετικότητας που συνδυάζει το χωρόχρονο – έννοια που είχε ήδη διατυπώσει στα πλαίσια της Ε.Θ.Σ. 10 χρόνια πριν – με το φαινόμενο της βαρύτητας



# Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Ο Αϊνστάιν έκανε την βασική παρατήρηση ότι όλα τα σώματα αισθάνονται την ίδια επιτάχυνση μέσα στο βαρυτικό πεδίο



$$a = \frac{F_{\text{net}}}{m} = \frac{10\,000 \text{ N}}{1000 \text{ kg}}$$

$$a = 10 \text{ m/s/s}$$

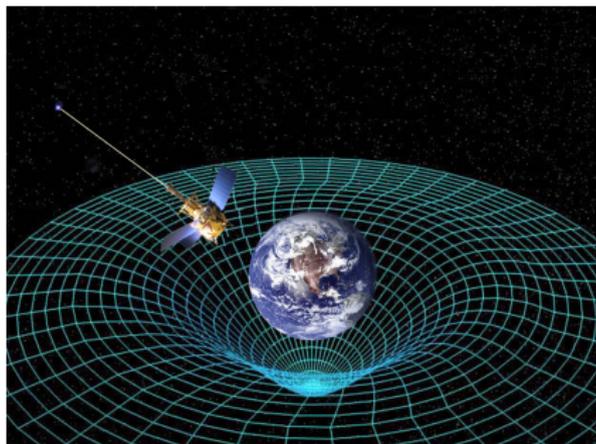


$$a = \frac{F_{\text{net}}}{m} = \frac{10 \text{ N}}{1 \text{ kg}}$$

$$a = 10 \text{ m/s/s}$$

## Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Υπέθεσε ότι η επιτάχυνση που ασκεί το βαρυτικό πεδίο είναι μια 'εγγενής' ιδιότητα του χωρόχρονου



Το μέτρο της επιτάχυνσης είναι ανάλογο της μάζας του σώματος που δημιουργεί το βαρυτικό πεδίο και ανάλογο της καμπυλότητας του χωρόχρονου

## Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Απο μαθηματικής πλευράς, η Γ.Θ.Σ. είναι αρκετά πιο περίπλοκη από την Ε.Θ.Σ. – η Γ.Θ.Σ. χρησιμοποιεί τανυστές σε αντίθεση με την Ε.Θ.Σ. που χρησιμοποιεί τετρα-διανύσματα

Προβλέπει όμως με φοβερά μεγάλη μαθηματική ακρίβεια:

- Την μετάπτωση του περιηλίου του Ερμή

## Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Απο μαθηματικής πλευράς, η Γ.Θ.Σ. είναι αρκετά πιο περίπλοκη από την Ε.Θ.Σ. – η Γ.Θ.Σ. χρησιμοποιεί τανυστές σε αντίθεση με την Ε.Θ.Σ. που χρησιμοποιεί τετρα-διανύσματα

Προβλέπει όμως με φοβερά μεγάλη μαθηματική ακρίβεια:

- Την μετάπτωση του περιηλίου του Ερμή
- Την εκτροπή των ακτίνων φωτός από τον Ήλιο

## Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Απο μαθηματικής πλευράς, η Γ.Θ.Σ. είναι αρκετά πιο περίπλοκη από την Ε.Θ.Σ. – η Γ.Θ.Σ. χρησιμοποιεί τανυστές σε αντίθεση με την Ε.Θ.Σ. που χρησιμοποιεί τετρα-διανύσματα

Προβλέπει όμως με φοβερά μεγάλη μαθηματική ακρίβεια:

- Την μετάπτωση του περιηλίου του Ερμή
- Την εκτροπή των ακτίνων φωτός από τον Ήλιο
- Την βαρυτική εξασθένηση του φωτός

## Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

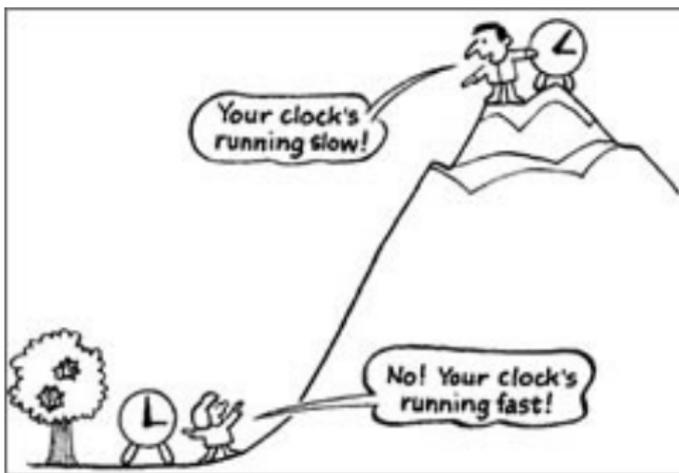
Απο μαθηματικής πλευράς, η Γ.Θ.Σ. είναι αρκετά πιο περίπλοκη από την Ε.Θ.Σ. – η Γ.Θ.Σ. χρησιμοποιεί τανυστές σε αντίθεση με την Ε.Θ.Σ. που χρησιμοποιεί τετρα-διανύσματα

Προβλέπει όμως με φοβερά μεγάλη μαθηματική ακρίβεια:

- Την μετάπτωση του περιηλίου του Ερμή
- Την εκτροπή των ακτίνων φωτός από τον Ήλιο
- Την βαρυτική εξασθένηση του φωτός
- Την βαρυτική διαστολή του χρόνου

# Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Όσο πιο κοντά στο κέντρο του βαρυτικού πεδίου βρίσκεται ένα ρολόι τόσο πιο αργά 'τρέχει'



Όπως και στην Ε.Θ.Σ. η έννοια του 'ταυτόχρονου' δεν υπάρχει πλέον - πόσο σημαντικές είναι όμως αυτές οι διαφορές χρόνου;

## Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Έστω ένα αεροπλάνο που πετά σε υψόμετρο  $H = 10000$  m με ταχύτητα  $v = 700$  Km/ώρα. Τότε το ρολόι του θα δείχνει:

- Λόγω της κίνησής του, από την Ε.Θ.Σ.:

$$\Delta t' \simeq \Delta t \left( 1 - \frac{v^2}{2c^2} \right) = \Delta t (1 - 2 \times 10^{-11})$$

- Λόγω του υψομέτρου του, από την Γ.Θ.Σ:

$$\Delta t' \simeq \Delta t \left( 1 + \frac{gH}{c^2} \right) = \Delta t (1 + 1 \times 10^{-12})$$

Αποκατάσταση του 'ταυτόχρονου' μεταξύ ενός ακίνητου και ενός ιπτάμενου ρολογιού εάν  $v^2 = 2gH$ , δηλαδή  $v = 1600$  Km/ώρα

## Συμπεράσματα

- Από τις αρχές του 20ου αιώνα, όλες οι προβλέψεις της Ε.Θ.Σ. και της Γ.Θ.Σ. έχουν επιβεβαιωθεί (είτε άμεσα είτε έμμεσα) επανηλειμμένα
- Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας βρίσκει τεράστια εφαρμογή στον μικρόκοσμο ενώ η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας στον μακρόκοσμο
- Για την διατύπωσή τους, ο Αϊνστάιν βασίστηκε στις υπάρχουσες θεωρίες και ιδέες της εποχής του και τις συνδύασε αρμονικά σε ένα καινούριο πλαίσιο

## Συμπεράσματα

“Πρέπει να μάθεις τους κανόνες του παιχνιδιού. Και μετά πρέπει να παίζεις καλύτερα από κάθε άλλον”

“Αυτός που δεν έκανε ποτέ κανένα λάθος δεν δοκίμασε ποτέ κάτι καινούριο”

“Ευφυία είναι 1% ταλέντο και 99% σκληρή δουλειά”

Αλβέρτος Αϊνστάιν