

Ιστορία των Θετικών Επιστημών

Ενότητα 14: Η Θεωρία της Σχετικότητας

Ευθύμιος Ντάλλας

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τμήμα: Ιστορίας, Αρχαιολογίας, Κοινωνικής
Ανθρωπολογίας

Σκοποί Ενότητας

Η κατανόηση της σχέσης ανάμεσα στη θεωρία της σχετικότητας και το πρόβλημα της ταυτοχρονίας. Η γνώση της θεωρίας του αιθέρα, τα προβλήματά της, και ο τρόπος που παραχώρησε τη θέση της στη σχετικότητα. Η κατανόηση της αλλαγής που έφερε η σχετικότητα στην εικόνα μας για το σύμπαν.

Περιεχόμενα Ενότητας

1. Γεωγραφικό μήκος
2. Πρότυπα του χώρου
3. Πρότυπα του χρόνου
4. Συγχρονισμένα ρολόγια – 1
5. Συγχρονισμένα ρολόγια – 2
6. Συγχρονισμένα ρολόγια – 3
7. Συγχρονισμένα ρολόγια – 4
8. Ο μεσημβρινός του Γκρήνουιτς
9. Οι ωριαίες άτρακτοι
10. Αιθέριος χρόνος
11. Πείραμα των Μίκελσον-Μόρλεϋ
12. Συστολή Λόρεντζ
13. Αϊνστάιν (1879-1955)
14. Ειδική σχετικότητα (1905)
15. Η αρχή της ισοδυναμίας
16. Ισχυρή αρχή της ισοδυναμίας
17. Γενική σχετικότητα (1915)
18. Το παράδοξο του Όλμπερς
19. Η διαστολή του σύμπαντος
20. Η Μεγάλη Έκρηξη
21. Το πληθωριστικό σύμπαν

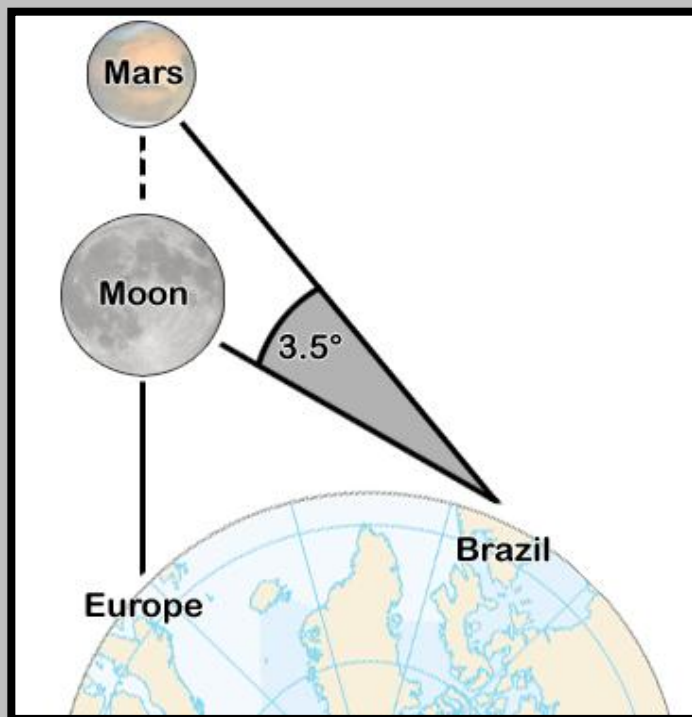
Η Θεωρία της Σχετικότητας

Γεωγραφικό μήκος

- ▶ Ο υπολογισμός του γεωγραφικού μήκους ήταν κρίσιμος στα υπερατλαντικά ταξίδια
- ▶ Απαιτούσε χρονόμετρα μεγάλης ακρίβειας

Αστρονομική μέθοδος υπολογισμού του γεωγραφικού μήκους που χρησιμοποιήθηκε από τον Αμέρικο Βεσπούτσι (Amerigo Vespucci) κατά την εξερεύνηση της νότιας Αμερικής (~1500)

(1)



Το ρολόι H5 του Χάρισον (~1770) με ακρίβεια 1/3" ανά ημέρα

(2)

Πρότυπα του χώρου

- ▶ Ως τα μέσα του 19ου αι. κάθε χώρα είχε τα δικά της μέτρα και σταθμά



Αντίγραφο του διεθνούς
πρότυπου μέτρου
(3)

- ▶ Μετά από 20 χρόνια διαβουλεύσεις, το 1889, όλες σχεδόν οι χώρες υιοθέτησαν το μέτρο και το χιλιόγραμμα ως μονάδες μέτρησης



Αντίγραφο του διεθνούς
πρότυπου χιλιόγραμμου
(4)

Πρότυπα του χρόνου

- ▶ Η ιδιόρρυθμη μέτρηση του χρόνου ήρθε στο προσκήνιο την ίδια εποχή
- ▶ Η προσπάθεια να γίνει δεκαδική η διαίρεση της ημέρας δεν ευόδωσε
- ▶ Οι ίδιες μονάδες χρόνου ήταν σε χρήση σε όλη την Ευρώπη



Ρολόι από την περίοδο της
γαλλικής επανάστασης (1793)
με 10 ώρες

Συγχρονισμένα ρολόγια - 1

- ▶ Στο Παρίσι και στη Βιέννη το 1870 υπήρχαν δίκτυα πεπιεσμένου αέρα που συγχρόνιζαν τα ρολόγια των πόλεων με την ώρα του αστεροσκοπείου
- ▶ Η καθυστέρηση (έως 15") λόγω της κίνησης του αέρα θεωρείτο ενοχλητική ήδη το 1880

Συγχρονισμένα ρολόγια - 2

- ▶ Το 1900 το σύστημα συγχρονισμού είχε γίνει ηλεκτρικό.
- ▶ Κάθε πόλη είχε τη δική της ηλιακή ώρα.
- ▶ Μια μεγαλύτερη ενοποίηση ήταν απαραίτητη, σε επίπεδο χώρας.



Η Βέρνη ολοκλήρωσε το δίκτυο ηλεκτρικά συγχρονισμένων ρολογιών το 1905. Το συγκεκριμένο ρολόι έβλεπε ο Αϊνστάιν όταν έβγαινε από το διαμέρισμά του και έστριβε αριστερά για να πάει στο Ελβετικό Γραφείο Ευρεσιτεχνιών. Σημειώνουμε ότι ώρα της Βέρνης εκείνη την εποχή ήταν 5 λεπτά μπροστά από την ώρα της Γενεύης

(6)

Συγχρονισμένα ρολόγια - 3

- ▶ Για τον ακριβέστερο υπολογισμό του γεωγραφικού μήκους χρησιμοποιήθηκε μια εξειδικευμένη τηλεγραφική συσκευή



Το μεγαλύτερο ατμόπλοιο της εποχής, το "Great Eastern" πόντισε το πρώτο υπερατλαντικό τηλεγραφικό καλώδιο το 1866, από την Ιρλανδία στη Νέα Γη. Τα μηνύματα από την Αγγλία στην Αμερική πλέον μπορούσαν να σταλούν μέσα σε μερικές ώρες

(7)

Συγχρονισμένα ρολόγια - 4

- ▶ Δυο αποστολές (αμερικανική και γαλλική) ολοκλήρωσαν ένα τεράστιο «πολύγωνο ταυτοχρονίας»
- ▶ Από αυτό διακλαδίζονταν συνδέσεις προς όλα τα σημαντικά αστεροσκοπεία



Το πολύγωνο
ταυτοχρονίας
περικλείει τη Νότιο
Αμερική

(8)

Ο μεσημβρινός του Γκρήνουιτς

- ▶ Οι νέοι ναυτικοί χάρτες ακριβείας έπρεπε να έχουν κάποιο κοινό σημείο αναφοράς
- ▶ Η επιλογή του μεσημβρινού του Γκρήνουιτς ως 0° ήταν καθαρά πολιτική



Το αστεροσκοπείο του Γκρήνουιτς

(9)

Οι ωριαίες άτρακτοι

- ▶ Ανάγκη για παγκόσμια τυποποίηση της ώρας
- ▶ Καθορισμός του UTC (1961)

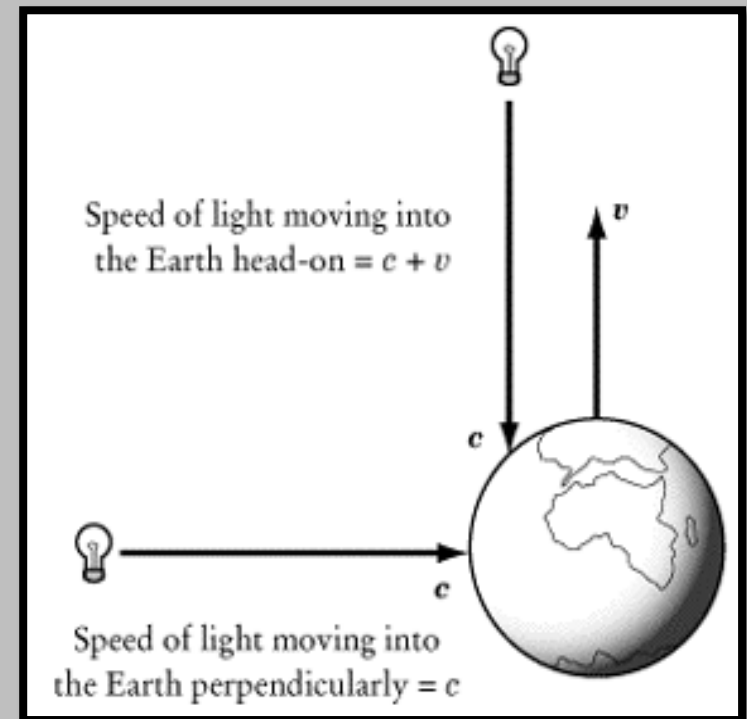


Οι ωριαίες άτρακτοι όπως ισχύουν σήμερα

(10)

Αιθέριος χρόνος

- ▶ Ο Πουανκαρέ προώθησε την τεχνολογία της ταυτοχρονίας όχι μόνο στην τοπογραφία, αλλά και στη φιλοσοφία και στη φυσική
- ▶ Ο αιθέρας γεμίζει όλο το σύμπαν
- ▶ Μπορούμε όμως να μετρήσουμε την ταχύτητα της Γης σε σχέση με τον αιθέρα;

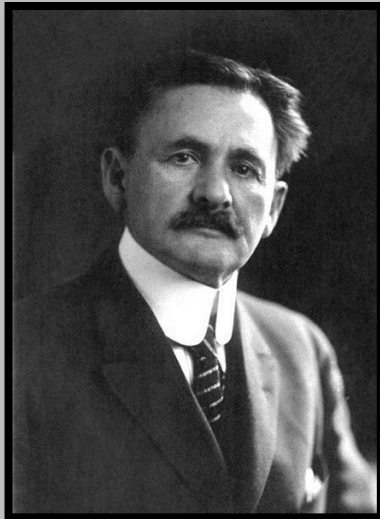


Πείραμα των Μίκελσον-Μόρλεϋ

- ▶ Το πείραμα επαναλήφθηκε πολλές φορές από το 1881 ως το 1990
- ▶ Η ταχύτητα της Γης προς τον αιθέρα είναι:
<8 km/s (1887)
<0,1 nm/s (1990)

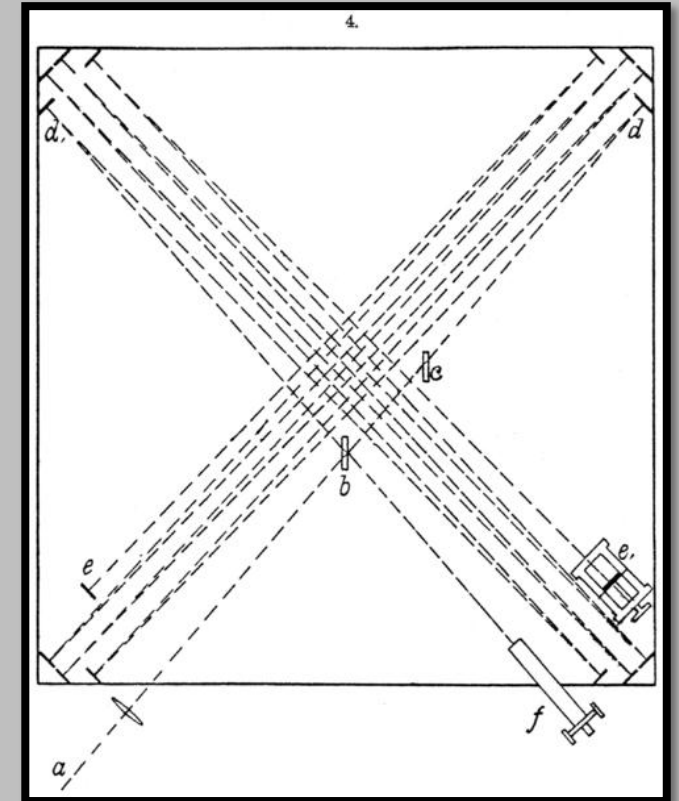
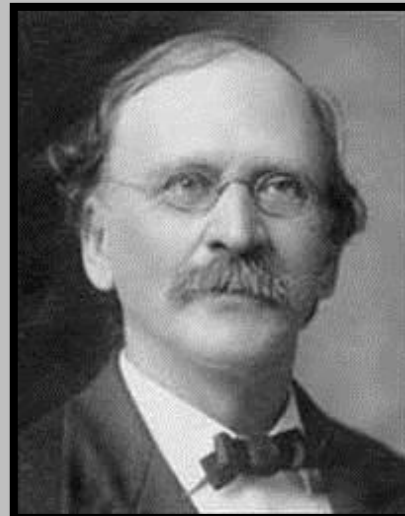
Ο Μίκελσον (Albert
Abraham Michelson,
1852-1931)

(12)



Ο Μόρλεϋ
(Edward Williams
Morley, 1838-
1923)

(13)



Ο τρόπος λειτουργίας της συσκευής τους

(14)

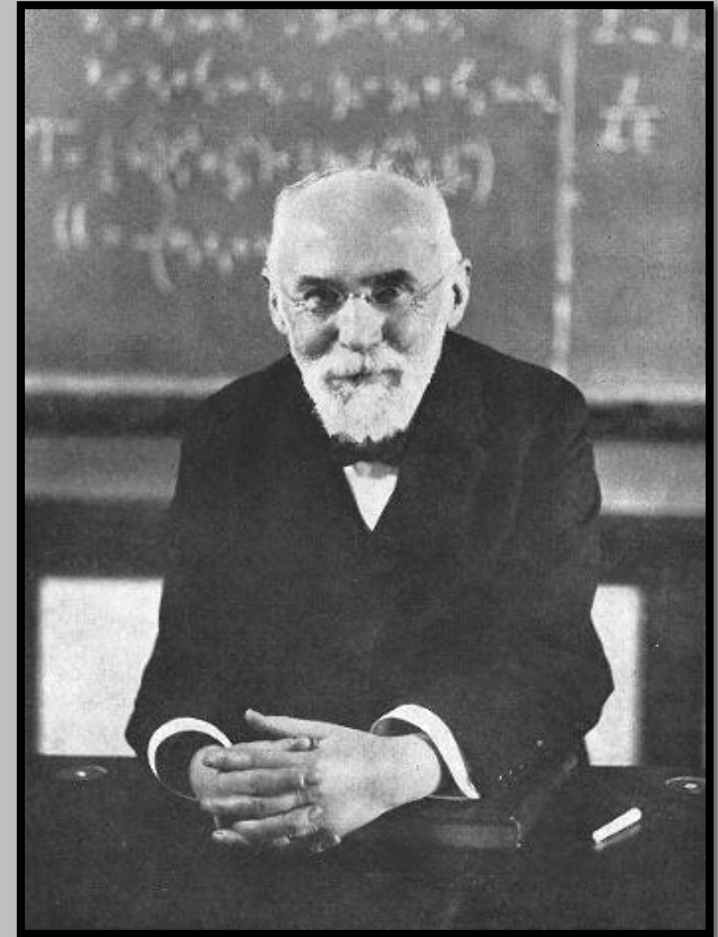
Συστολή Λόρεντζ

- ▶ Ο αιθέρας είναι ακίνητος
- ▶ Η κίνηση μέσα στον αιθέρα προκαλεί συστολή των αντικειμένων στη διεύθυνση κίνησής τους
- ▶ Επίσης προκαλεί μια διαστολή του χρόνου
- ▶ Η θεωρία του Λόρεντζ «σώζει τα φαινόμενα»

$$L' = \frac{L}{\gamma(v)} = L \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$\Delta t' = \gamma \Delta t = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

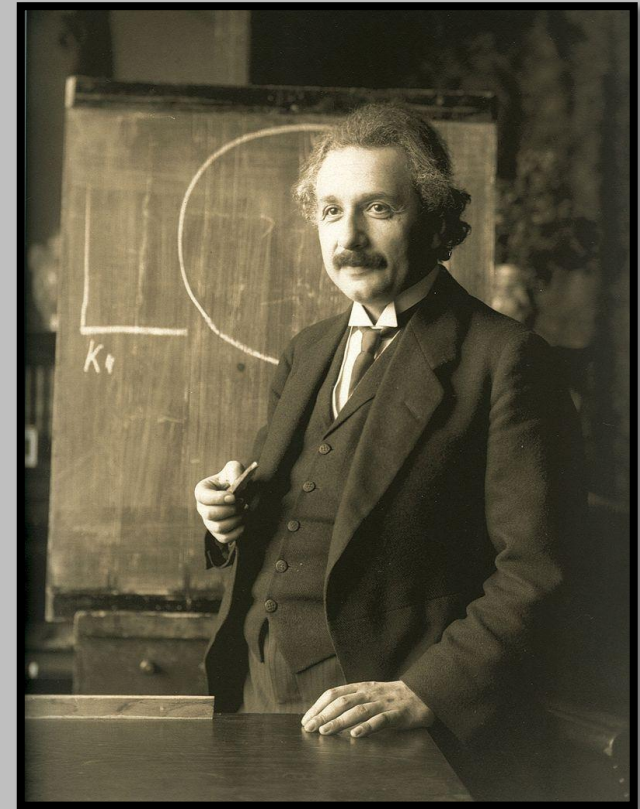
Οι τύποι της συστολής μήκους και της διαστολής χρόνου



Ο Λόρεντζ (Hendrik Antoon Lorentz, 1853- 1928)

Αϊνστάιν (1879-1955)

- ▶ Το 1905 πήρε το διδακτορικό του και παρουσίασε πέντε ιστορικές εργασίες:
 - Ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου
 - Νέος τρόπος υπολογισμού του μεγέθους των μορίων
 - Ερμηνεία της κίνησης Μπράουν
 - Θεωρία της ειδικής σχετικότητας
 - Ισοδυναμία ενέργειας-μάζας
- ▶ Η δεύτερη ήταν το PhD, η πρώτη το Νόμπελ



Ο Αϊνστάιν (Albert Einstein, 1879-1955)

Ειδική σχετικότητα (1905)

- ▶ Δύο παραδοχές (για αδρανειακούς παρατηρητές)
 - ▶ Αναλλοίωτοι φυσικοί νόμοι
 - ▶ Σταθερή ταχύτητα του φωτός

- ▶ Τρία αποτελέσματα
 - ▶ Διαστολή του χρόνου
 - ▶ Συστολή του μήκους
 - ▶ $E = m c^2$

Η αρχή της ισοδυναμίας

▶ Γαλιλαίος:

- ▶ Όλα τα σώματα σε ένα βαρυτικό πεδίο δέχονται την ίδια επιτάχυνση, ανεξάρτητα από τις ιδιότητές τους

▶ Ειδική σχετικότητα:

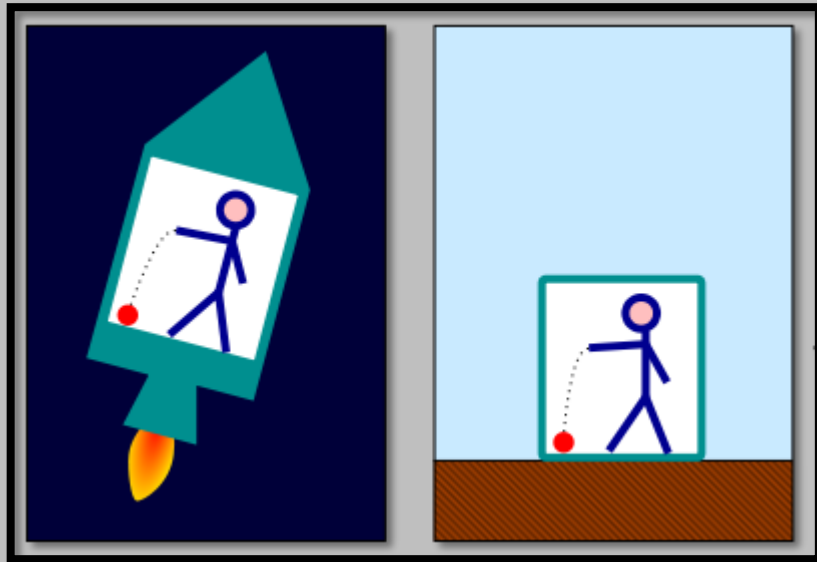
- ▶ Το αποτέλεσμα κάθε μη-βαρυτικού πειράματος σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς είναι ανεξάρτητο από τη θέση και τη ταχύτητα του συστήματος

▶ Γενική σχετικότητα:

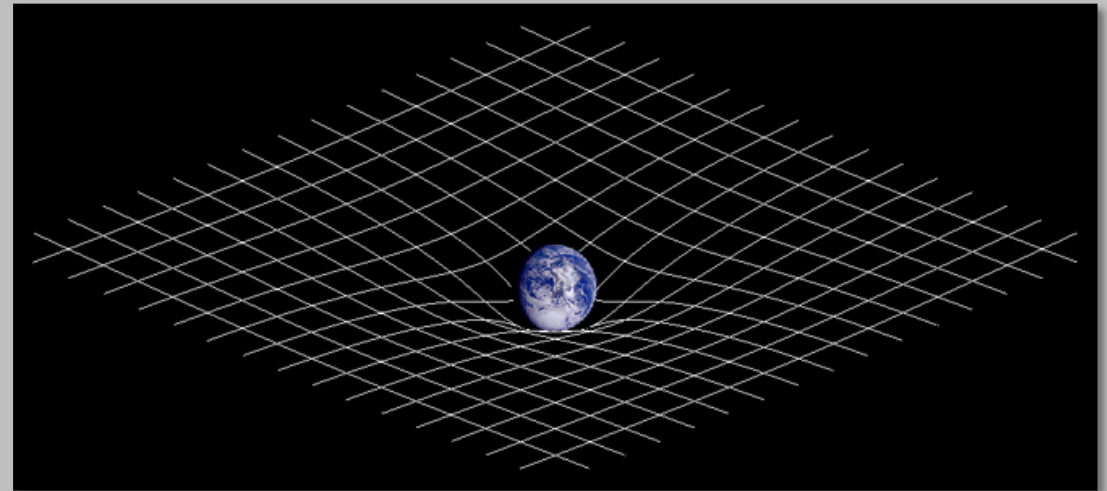
- ▶ Το αποτέλεσμα κάθε πειράματος (ακόμα και βαρυτικού) σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς είναι ανεξάρτητο από τη θέση και τη ταχύτητα του συστήματος

Ισχυρή αρχή της ισοδυναμίας

- ▶ Αυτό που νιώθουμε ως βαρύτητα είναι το αποτέλεσμα της γεωμετρίας του χωροχρόνου



Το πείραμα του ασανσέρ
(17)



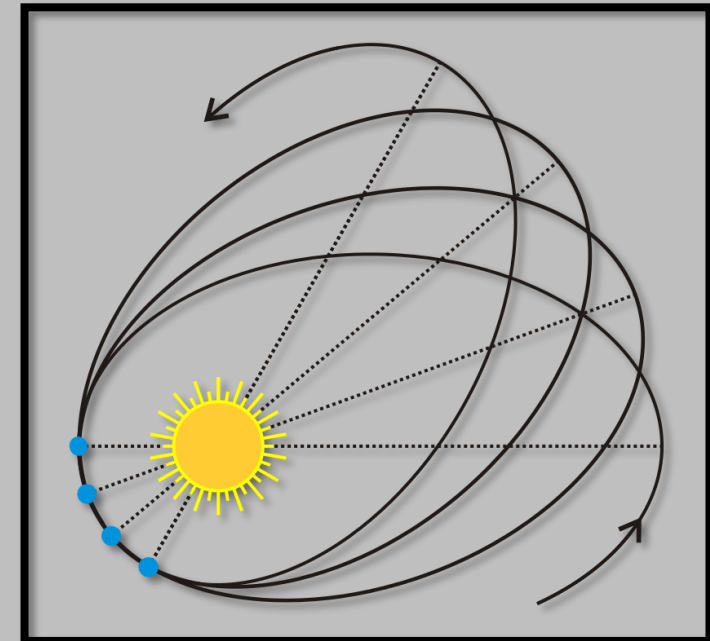
Καμπύλωση του χωροχρόνου
(18)

Γενική σχετικότητα (1915)

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Η βασική εξίσωση της Γενικής
Σχετικότητας

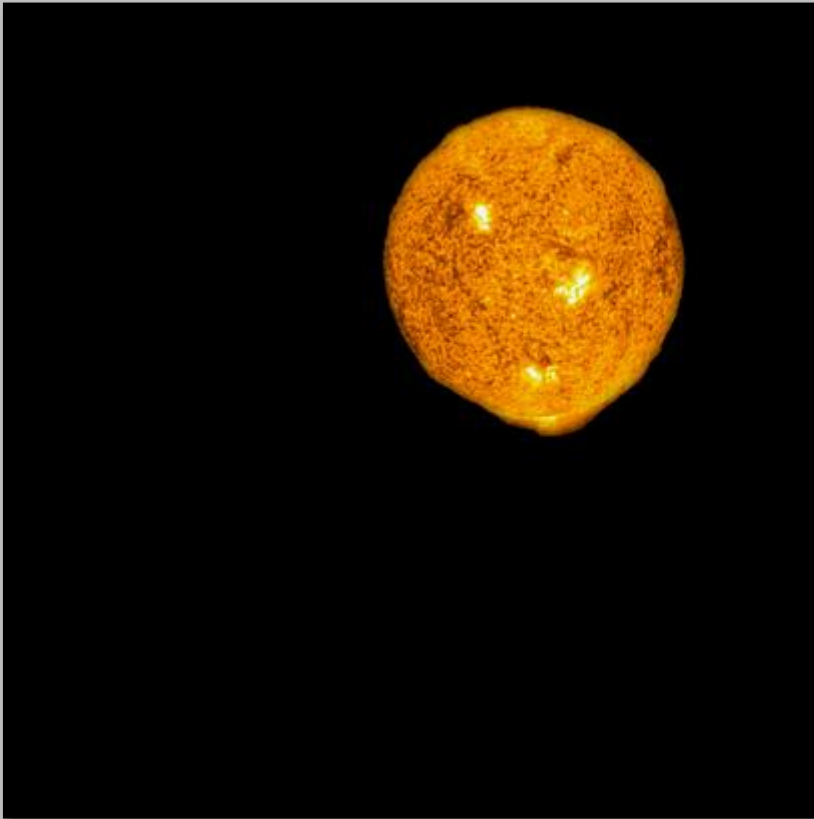
- ▶ Παρατηρήσιμες προβλέψεις:
 - Μετάπτωση του περιηλίου (1915)
 - Απόκλιση των ακτίνων φωτός (1919)
 - Βαρυτική μετάπτωση του φωτός (1959)
 - Καθυστέρηση των κυμάτων ραντάρ (1964)
 - Μελανές οπές (1967)
 - Βαρυτικά κύματα (?)



Η μετάπτωση του περιηλίου (19)

Το παράδοξο του Όλμπερς

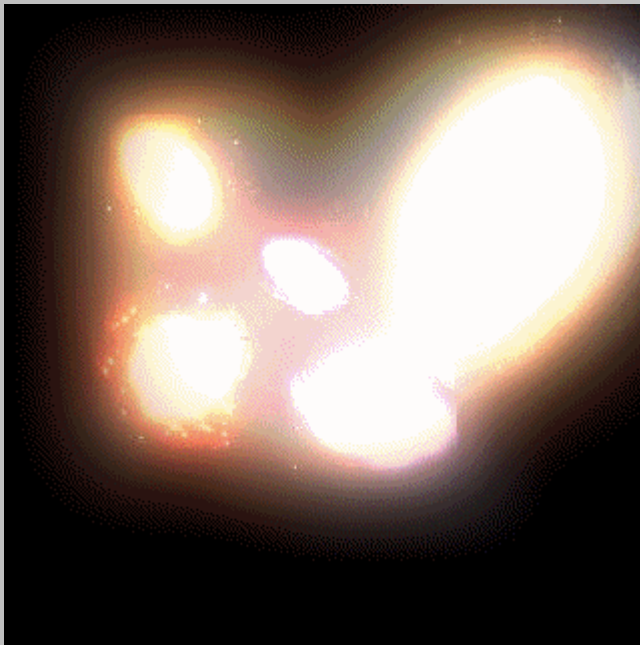
- ▶ Το σύμπαν πρέπει να είναι πεπερασμένο ή να μην είναι αιώνιο (ή τίποτα από τα δύο)



- ▶ Θεωρία σταθερής κατάστασης:
 - Το σύμπαν είναι πεπερασμένο, αλλά δεν αλλάζει μορφή με την πάροδο του χρόνου
 - Αυτό απαιτεί η βαρύτητα που έλκει τα σώματα να εξισορροπείται επακριβώς από την πίεση που προσπαθεί να τα διαλύσει

Η διαστολή του σύμπαντος

- ▶ Οι άλλοι γαλαξίες μοιάζουν να απομακρύνονται από τον δικό μας
- ▶ Όσο πιο μακριά είναι ένας γαλαξίας, τόσο πιο γρήγορα μοιάζει να απομακρύνεται



Αναπαράσταση της
διαστολής του Σύμπαντος

(21)

Η Μεγάλη Έκρηξη

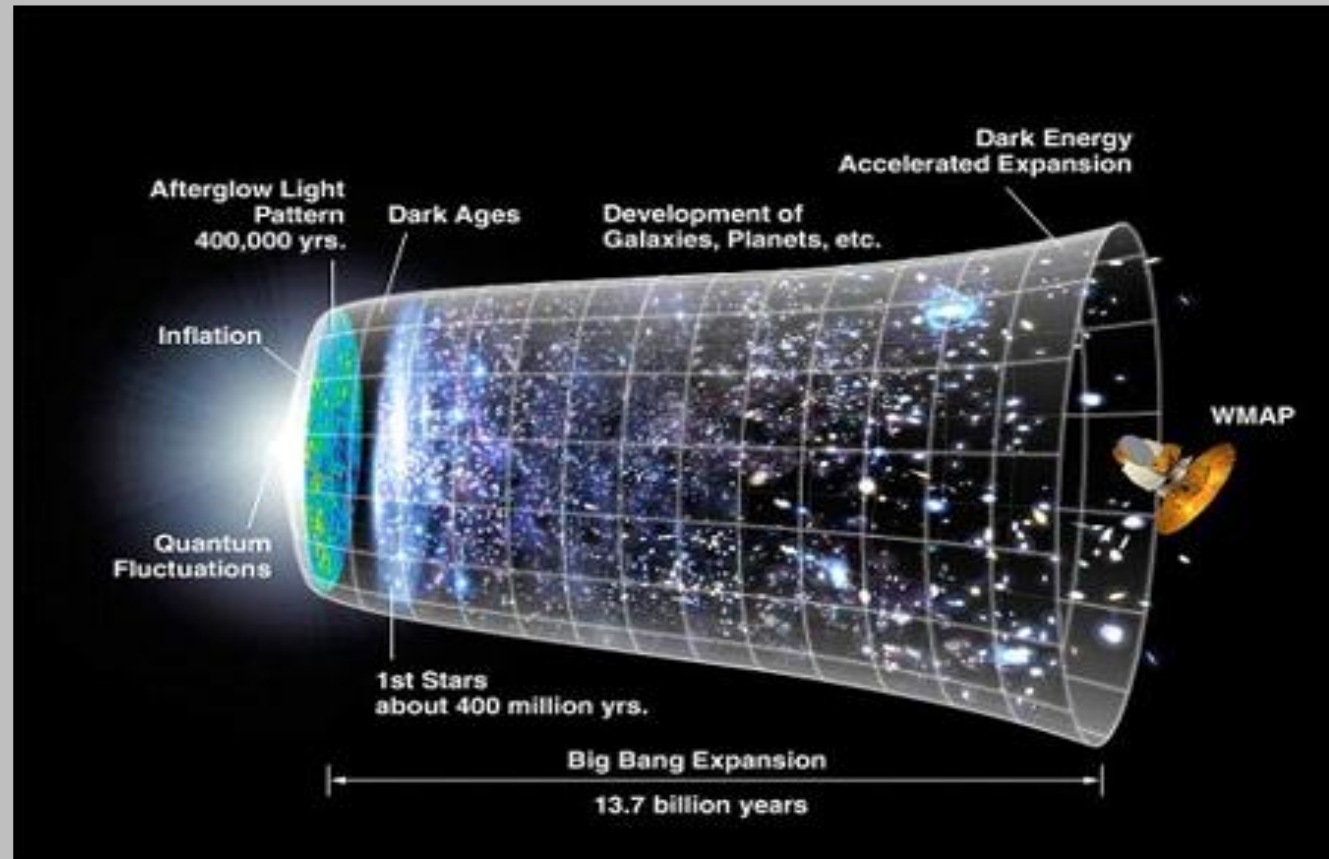
- ▶ Η θεωρία του Big Bang προτάθηκε το 1929
 - Προβλέπει ότι το σύμπαν δημιουργήθηκε πριν 13,7 δισεκατομμύρια χρόνια από την έκρηξη μια υπέρπυκνης κατάστασης της ύλης
- ▶ Το σύμπαν διαστέλλεται
 - Στο μέλλον είτε θα συνεχίσει να διαστέλλεται είτε θα αρχίσει να συστέλλεται
 - Οι σύγχρονες παρατηρήσεις συνηγορούν υπέρ της πρώτης άποψης

Το πληθωριστικό σύμπαν

- ▶ Η σύγχρονη θεωρία είναι αρκετά πιο πολύπλοκη

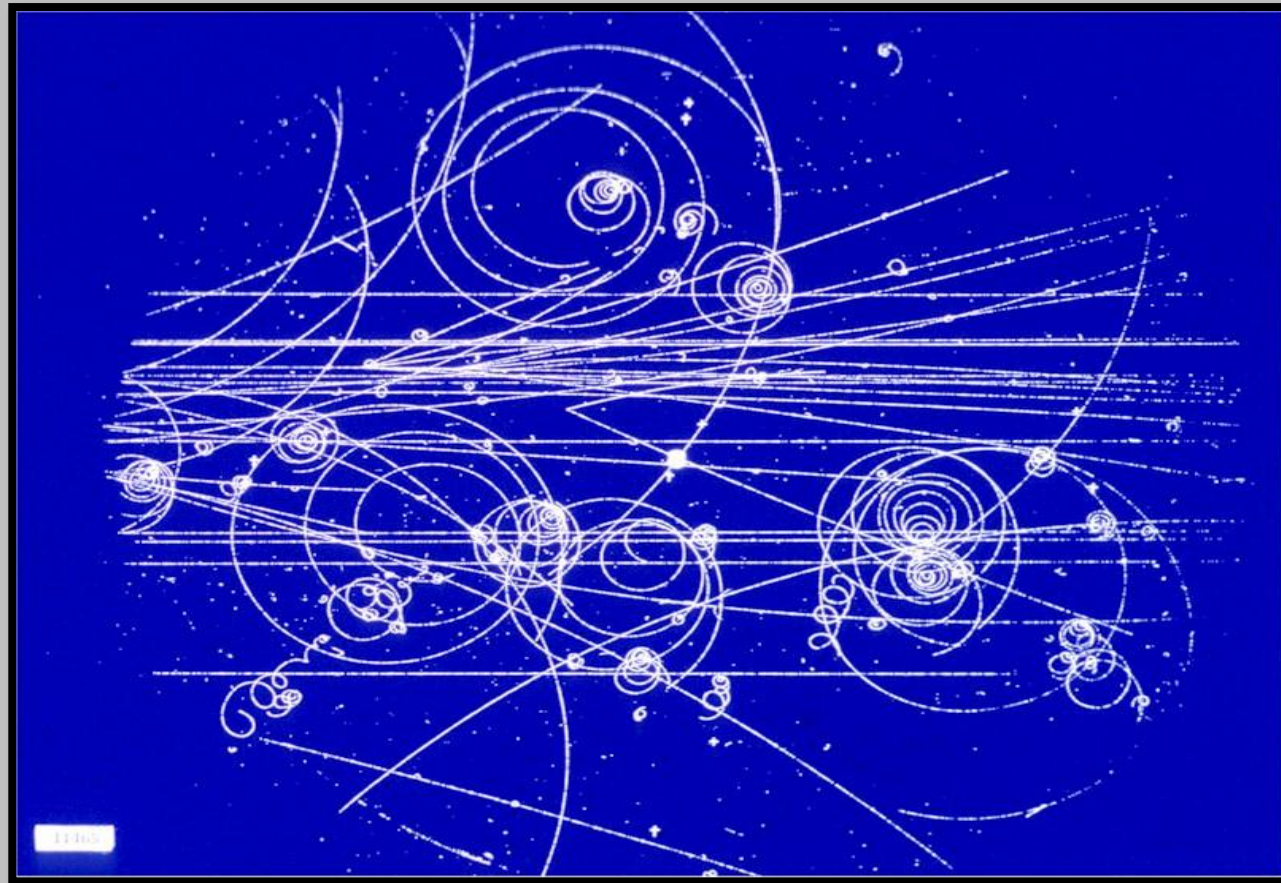
Η σύγχρονη άποψη για το σύμπαν, με την πληθωριστική φάση στην αρχή και την επιταχυνόμενη φάση την τρέχουσα εποχή

(22)



ΣΤΟ ΕΠΌΜΕΝΟ...

► Η κβαντική φυσική



(23)

Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «**Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση**» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση, Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων 1

- Εικόνα 1: <" Longitude Vespucci"><Δημιουργός: Xiaphias.><CCBYSA> < http://en.wikipedia.org/wiki/File:Longitude_Vespucci.png><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 2: <" Harrison's Chronometer H5"><Δημιουργός: Racklever><CCBYSA> < http://en.wikipedia.org/wiki/File:Harrison%27s_Chronometer_H5.JPG><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 3: <" Platinum-Iridium meter bar"><Δημιουργός: Άγνωστος><PD> < http://en.wikipedia.org/wiki/File:Platinum-Iridium_meter_bar.jpg><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 4: <" National prototype kilogram K20 replica"><Δημιουργός: Άγνωστος><PD> < http://en.wikipedia.org/wiki/File:National_prototype_kilogram_K20_replica.jpg><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 5: <" Clock-french-republic"><Δημιουργός: Cormullion><CCBYSA> < <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Clock-french-republic.jpg>><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 6: <" Zytglogg Bern"><Δημιουργός: Dean Dalton><PD> < http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zytglogg_Bern.jpg><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 7: <" Engraving before term of future Great-Eastern"><Δημιουργός: Άγνωστος><PD> < http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Engraving_before_term_of_future_Great-Eastern.jpg><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 8: <" Πολύγωνο ταυτοχρονίας"><Δημιουργός: Άγνωστος><Fair Use> < Πηγή: Άγνωστη>
- Εικόνα 9: <" Royal Observatory, Greenwich"><Δημιουργός: Photograph by Mike Peel><CCBYSA> < http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Royal_Observatory,_Greenwich_2.jpg><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 10: <" Timezones UTC-11"><Δημιουργός: Original uploader was MrMingsz at en.wikipedia><PD> < http://en.wikipedia.org/wiki/File:Timezones2008_UTC-11.png><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 11: <" Αναπαράσταση του πειράματος των Μικελσον και Μόρλεϋ"><Δημιουργός: Ask the Physicist><fair use> < http://askthephysicist.com/ask_phys_q&a_old5.html>< Ask the Physicist >
- Εικόνα 12: <" Albert Abraham Michelson"><Δημιουργός: Original uploader was Bunzil at en.wikipedia><PD> < http://en.wikipedia.org/wiki/File:Albert_Abraham_Michelson2.jpg><Wikimedia Commons>

Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων 2

- Εικόνα 13: <" Edward Williams Morley"><Δημιουργός: Άγνωστος><PD> < http://en.wikipedia.org/wiki/File:Edward_Williams_Morley2.jpg><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 14: <" On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether"><Δημιουργός: Μικελσον και Μόρλεϋ><PD> < http://en.wikipedia.org/wiki/File:On_the_Relative_Motion_of_the_Earth_and_the_Luminiferous_Ether_-_Fig_4.png><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 15: <" Hendrik Antoon Lorentz"><Δημιουργός: The website of the Royal Library shows a picture from the same photosession that is attributed to Museum Boerhaave. The website of the Museum states "vrij beschikbaar voor publicatie" (freely available for publication).><PD> < http://en.wikipedia.org/wiki/File:Hendrik_Antoon_Lorentz.jpg><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 16: <" Einstein 1921 by F Schmutzer - restoration"><Δημιουργός: Ferdinand Schmutzer.><PD> < http://en.wikipedia.org/wiki/File:Einstein_1921_by_F_Schmutzer_-_restoration.jpg><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 17: <" Elevator gravity"><Δημιουργός: derivative work: Pbroks13 (talk), Elevator_gravity2.png: Markus Poessel (Mapos) .><CCBYSA> < http://en.wikipedia.org/wiki/File:Elevator_gravity.svg><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 18: <" Illustration of spacetime curvature"><Δημιουργός: Johnstone><CC BY SA> < http://en.wikipedia.org/wiki/File:Spacetime_curvature.png><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 19: <" Perihelion precession. Blue circle - mooving perihelion, dotted line - semi-major axis"><Δημιουργός: Mpfiz><PD> < http://en.wikipedia.org/wiki/File:Perihelion_precession.svg><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 20: <" Olber's Paradox - All Points"><Δημιουργός: Kmarinas86 .><CCBYSA> < http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Olber%27s_Paradox_-_All_Points.gif><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 21: <" Expansion de l'univers"><Δημιουργός: Rogilbert.><PD> < http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Expansion_de_l%27univers.gif><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 22: <" Inflation Universe"><Δημιουργός: NASA.><PD> < http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inflation_Universe.png><Wikimedia Commons>
- Εικόνα 23: <" bubble chamber"><Δημιουργός: Άγνωστος><CCNCSA> < <http://www.learningwithatlas-portal.eu/fr/node/93780>><Learning with Atlas at CERN>