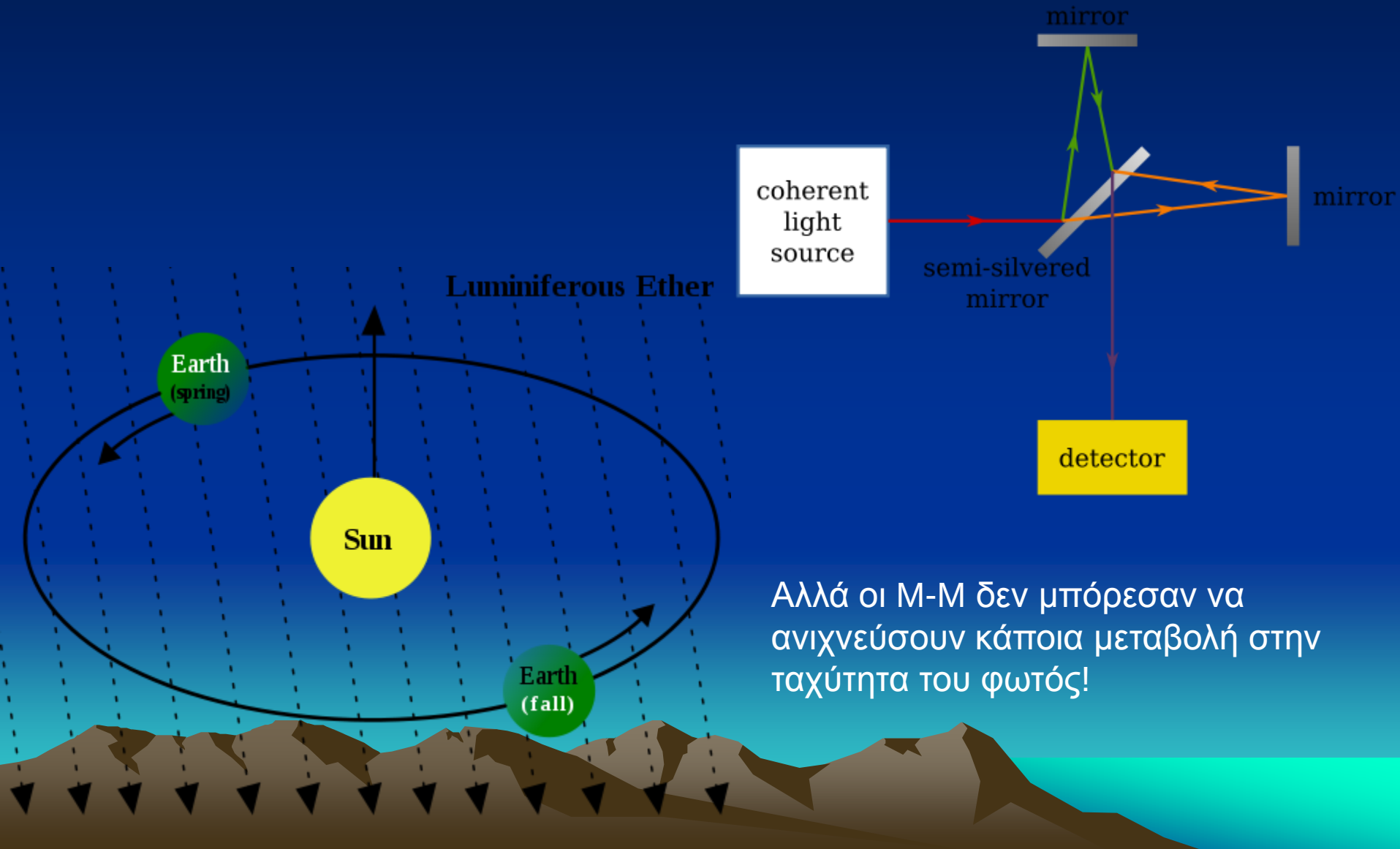


ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ - EINSTEIN

Χάρης Βάρβογλης
Τμήμα Φυσικής
Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Το πείραμα των M-M



Προσπάθειες ερμηνείας του αποτελέσματος του πειράματος των M-M

- Δεν υπάρχει αιθέρας (π.χ. Ernst Mach).
- Ο αιθέρας υπάρχει, αλλά επηρεάζει τις ιδιότητες των κινούμενων σωμάτων (π.χ. FitzGerald).
 - Η ιδέα του FitzGerald αναπτύχθηκε από τον Lorentz,
 - και αργότερα από τον Poincaré (δημοσίευση στις 5 Ιουνίου 1905).
- Ο Einstein υποβάλει την εργασία του για τη ΕΘΣ στις 30 Ιουνίου.
- Οι σχέσεις μετασχηματισμού που προκύπτουν από τις δύο δημοσιεύσεις είναι ίδιες (αναφέρονται όμως μόνο στη δημοσίευση του Poincaré).
 - Αλλά η θεωρία του Einstein βασίζεται σε διαφορετικά, και πιο «ελκυστικά» από φυσική σκοπιά, αξιώματα
 - και, πάνω απ' όλα, έχει μόνο 2 αξιώματα, αντί για τα 3 της θεωρίας του Poincaré (ξυράφι του Ockham!).
- ~20 χρόνια αργότερα ο Καραθεοδωρή, ξεκινώντας από «τετριμμένες» υποθέσεις, αποδεικνύει ότι η ΕΘΣ είναι μια «ειδική» περίπτωση πιο γενικών θεωριών.

Αξιώματα της ΕΘΣ του Einstein

- 1. Οι νόμοι της Φυσικής είναι οι ίδιοι σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς.
- 2. Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι η ίδια για όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς.
- Τα αξιώματα δεν έχουν εμφανή μαθηματική μορφή, αλλά έχουν ως συνέπεια ότι η **στοιχειώδης απόσταση** στον χωροχρόνο δίνεται από τη σχέση:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

- Και είναι αμετάβλητη (όπως το μήκος ενός μολυβιού που το μετακινούμε ή το περιστρέφουμε).

Παρεπόμενα της ΕΘΣ

- Η «απόσταση» ds^2 είναι θετική για όλα τα υλικά σώματα (στον κόσμο μας!) και ισούται με 0 για τα φωτόνια.
- Διαφέρει, λοιπόν, από την «συνήθη» απόσταση που γνωρίζουμε από το Πυθαγόρειο Θεώρημα.
- Ο νόμος μετασχηματισμού των ταχυτήτων από ένα αδρανειακό σύστημα A σε ένα άλλο B δεν είναι πια ο (Γαλιλαϊκός) $v_B = v_A + V_{AB}$ αλλά ο
$$v_B = (v_A + V_{AB}) / (1 + v_A \cdot V_{AB} / c^2)$$
- Ο Η/Μ γίνεται συμβατός με τη Μηχανική, με τη θυσία των μετασχηματισμών του Γαλιλαίου!

Γενική Θεωρία Σχετικότητας (ΓΘΣ)

- Τροποποίηση των αξιωμάτων της ΕΘΣ:
 - Οι νόμοι της Φυσικής είναι ίδιοι *σε όλα τα συστήματα αναφοράς*, είτε αδρανειακά είτε όχι.
 - Λόγω της *αρχής της ισοδυναμίας*, επιταχυνόμενο σύστημα αναφοράς ισοδυναμεί με βαρυτικό πεδίο.
 - Άρα η ΓΘΣ θα πρέπει να περιλαμβάνει τη βαρύτητα.
- Στη ΓΘΣ η στοιχειώδης απόσταση ds^2 είναι:

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu} x^{\mu} x^{\nu}$$

όπου $g_{\mu\nu}$ είναι ένας τανυστής 2^{ης} τάξης (δηλ. ένας πίνακας 4x4 με συγκεκριμένες ιδιότητες).

- Ο δείκτης 0 παριστάνει τον χρόνο και οι δείκτες 1-3 τον χώρο.

ΓΘΣ - II

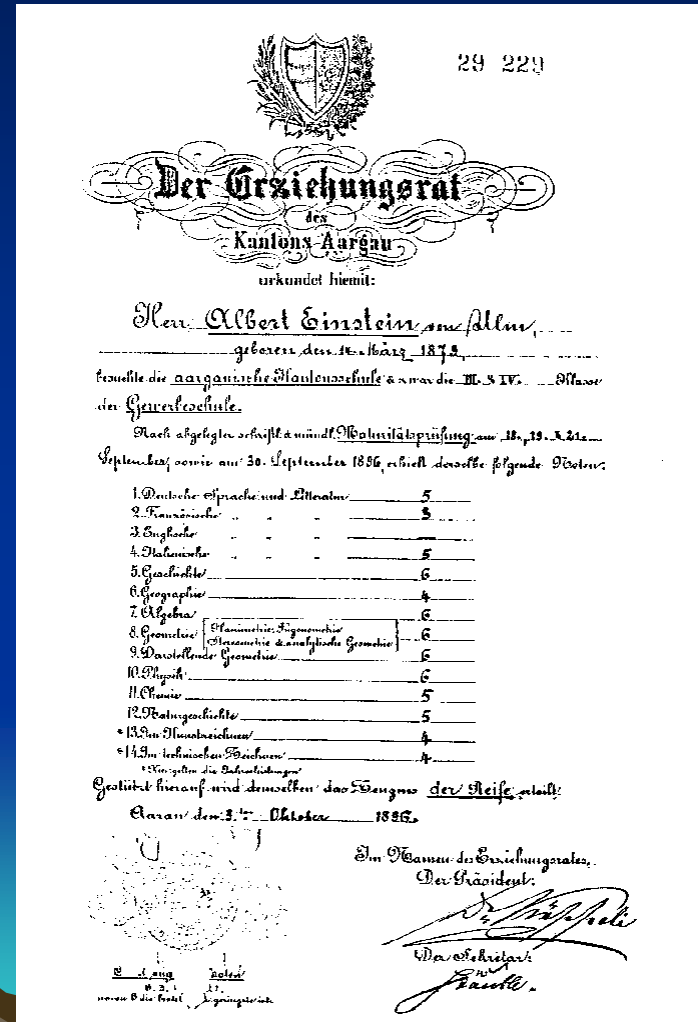
- Από τη ΓΘΣ καταλήγουμε στην ΕΘΣ αν θέσουμε $g_{00} = 1$, $g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1$ και $g_{ij} = 0$, $i \neq j$.
- Αλλά η διαφορά είναι πολύ περισσότερο από αυτό!
- Η ΕΘΣ είναι μια «διόρθωση» της Κλασικής Φυσικής για μεγάλες ταχύτητες.
- Η ΓΘΣ είναι μια *θεωρία της Βαρύτητας*, η οποία
 - αποφεύγει το πρόβλημα της «δράσης από απόσταση»
 - είναι κατάλληλη για Κοσμολογία (όχι απειρισμοί)
 - προβλέπει φαινόμενα άγνωστα το 1915.
- Μοιάζει με την Η/Μ θεωρία του Maxwell, ως προς το ότι η ΓΘΣ προτάθηκε όχι για να ερμηνεύσει πειραματικά δεδομένα, αλλά μόνο για λόγους «κομψότητας».

Σχετικά με τον Einstein

- Γιατί θεωρούμε τον Einstein «μεγάλο»;
 - Επειδή ξεπέρασε την Κλασική Φυσική, θεμελιώνοντας της Κβαντομηχανική, και εισήγαγε τη Σχετικότητα.
- Τα αρνητικά σημεία του:
 - Δεν πίστευε στην Κβαντομηχανική (συγκεκριμένα στην ερμηνεία της Κοπεγχάγης), παρόλο που **ουσιαστικά** αυτός την είχε εισαγάγει στη Φυσική.
 - Δεν κατάφερε να διατυπώσει μια Ενοποιημένη θεωρία Πεδίου – Θεωρία των Πάντων (κάτι που ούτε κανείς άλλος κατάφερε μέχρι σήμερα).
- Η ζωή του πέρα από την Επιστήμη.
- Εκτίμηση της κληρονομιάς του στη Σύγχρονη Φυσική.

Einstein: σχολείο και πανεπιστήμιο

- Επανέλαβε την τελευταία τάξη στο Λύκειο, για να πάρει καλύτερους βαθμούς.
- Γράφτηκε στο ΕΤΗ της Ζυρίχης.
- Ανέπτυξε φιλία με τον συμμαθητή του, Marcel Grossman.



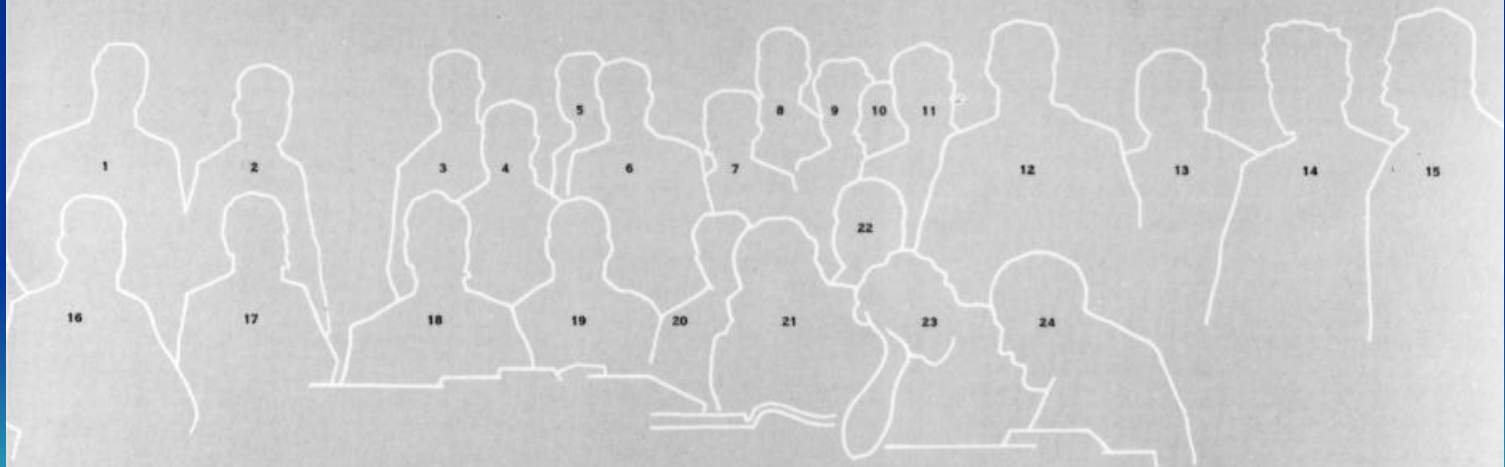
Πτυχίο και PhD



- Πήρε πτυχίο το 1900.
- Διορίσθηκε υπάλληλος στο γραφείο ευρεσιτεχνιών της Βέρνης (1902).
- 1905 (annus mirabilis): PhD & 4 δημοσιεύσεις.
- Όπως και ο Νεύτωνας, 300 χρόνια νωρίτερα, εργαζόταν μόνος, μακριά από ερευνητικά κέντρα και χωρίς συνεργάτες.

Μάρτιος 1905

- Πρόβλημα: Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή:
 - => *μόνο μερική συσχέτιση* μεταξύ της φωτεινής ροής και του ρεύματος
 - => *συσχέτιση* μεταξύ του ρεύματος και του χρώματος του φωτός.
- Επικρατούσα άποψη: αδυναμία ερμηνείας.
- Άποψη του Einstein:
$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = h \cdot \nu - E_0$$
- Φωτόνια! – Πρώτη επιβεβαίωση της θεωρίας των κβάντα του Planck (της οποίας ούτε ο Planck δεν ήταν ισχυρός υποστηρικτής!)
- Βραβείο Νομπέλ Φυσικής, 1921
- Καθυστερημένο; Βλέπε 1^ο Συνέδριο Solvay (1911, James Jeans vs. Poincaré) και συστατική επιστολή του Rutherford για τον Barkla (1917).



CONSEIL DE PHYSIQUE SOLVAY, BRUXELLES 1911

1. GOLDSCHMIDT
2. PLANCK
3. RUBENS
4. SOMMERFELD

5. LINDEMAN
6. DE BROGLIE
7. KNUDSEN
8. HASENOHRL

9. HOSTELET
10. HERZEN
11. JEANS
12. RUTHERFORD

13. KAMERLINGH ONNES
14. EINSTEIN
15. LANGEVIN
16. NERNST

17. BRILLOUIN
18. SOLVAY
19. LORENTZ
20. WARBURG

21. PERRIN
22. WIEN
23. MME CURIE
24. POINCARÉ

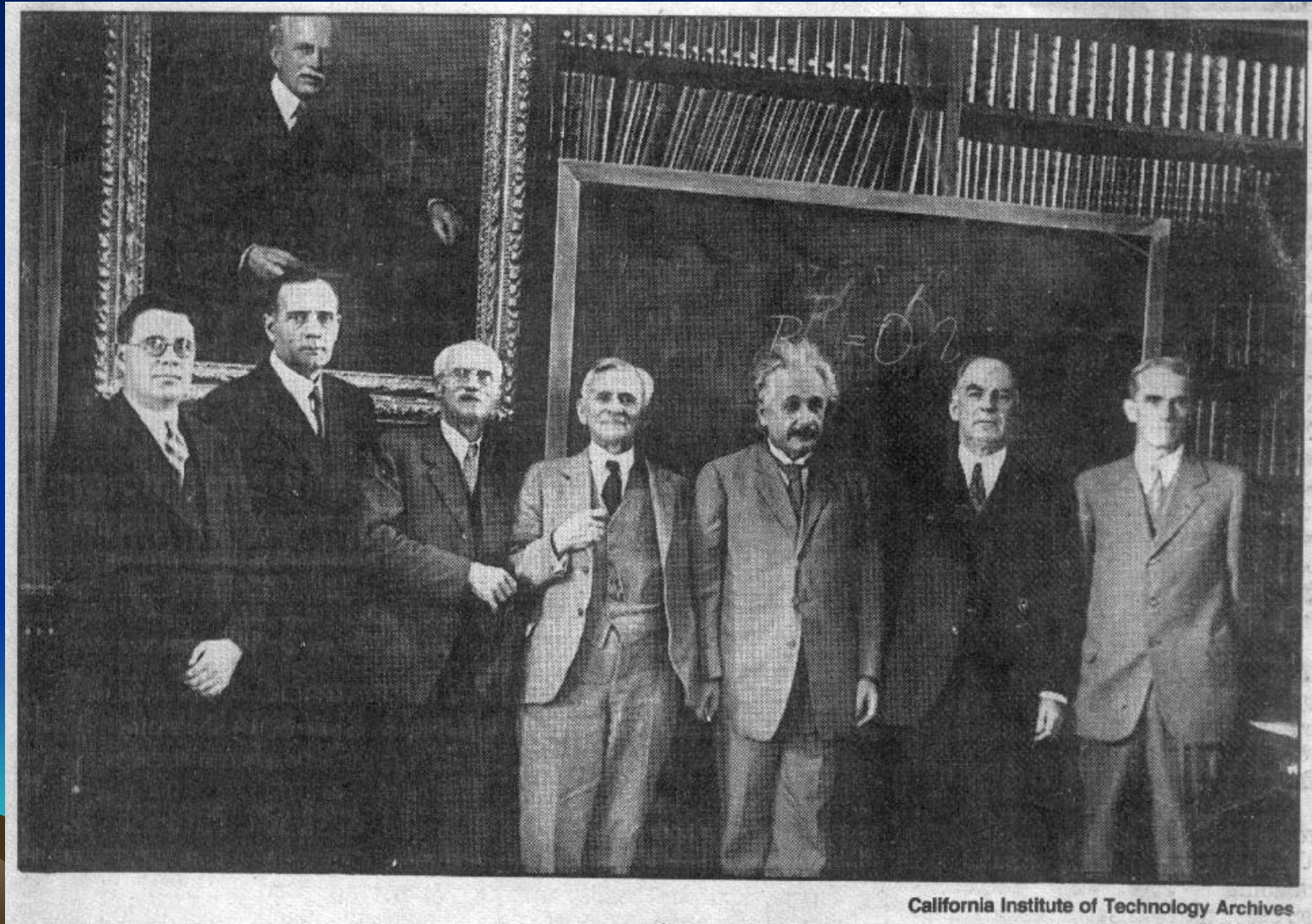
Μάιος 1905

- Πρόβλημα: *κίνηση Brown*
=> διαρκής κίνηση των σωματιδίων της γύρης.
 - Επικρατούσα άποψη:
 - αδυναμία μέτρησης της ταχύτητάς τους.
 - άποψη του Einstein: $\langle x^2 \rangle = D \cdot t$
 - Συνέπειες:
 - $v \sim t^{-1/2}$: αποκλίνουσα (και άρα απροσδιόριστη) ταχύτητα!
 - Σύνδεση των ατομικών σταθερών με μακροσκοπικές ποσότητες.
 - Επιβεβαίωση του αριθμού Avogadro.
 - Πειραματική εφαρμογή από τον Perrin (βραβείο Nobel Φυσικής, 1926).
- 

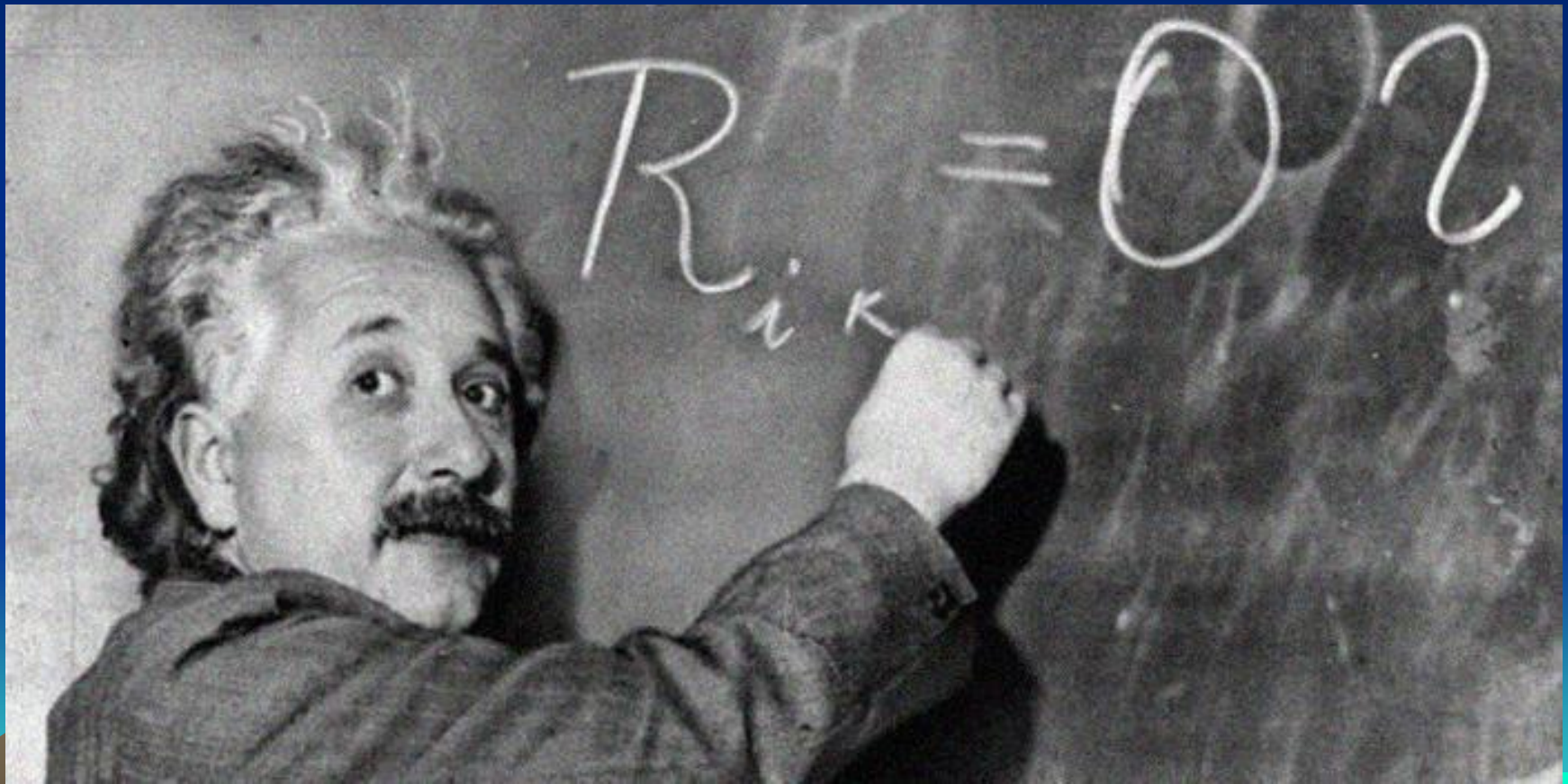
Ιούνιος 1905

- Πρόβλημα: Ασυμβατότητα του Ηλεκτρομαγνητισμού και της Κλασικής Μηχανικής (*πείραμα Michelson-Morley*).
- Δίλημμα: Maxwell ή Γαλιλαίος-Νεύτωνας;
- Επικρατούσα άποψη:
 - «Πάντρεμα» μέσω των μετασχηματισμών Poincaré-Lorentz
 - Αλλά: ιδιότητες του αιθέρα (ακαμψία - διαπερατότητα, συστολή μήκους – διαστολή χρόνου);
- Άποψη Einstein:
 - Ο Maxwell έχει δίκιο!
 - Διάδοση των Η/Μ κυμάτων στο κενό (ΌΧΙ αιθέρας!)
 - c : παγκόσμια σταθερά
 - Ισοδυναμία αδρανειακών συστημάτων.
- Ειδική θεωρία Σχετικότητας (ΕΘΣ):
 - Ένας από τους δύο πυλώνες της Σύγχρονης Φυσικής

Ο Michelson και ο Einstein στο Αστεροσκοπείο του Mt. Wilson, 1931



...και η «στημένη» φωτογραφία



Σεπτέμβριος 1905

- Πρόβλημα: Μάζα και ΕΘΣ.
- Επικρατούσα άποψη: σκεπτικισμός!
- Άποψη του Einstein: $E = m \cdot c^2$.
 - Δυνατότητα πυρηνικής σχάσης.
 - Αλυσιδωτή αντίδραση: ατομική βόμβα.
 - Πυρηνική σύντηξη: ηλιακή – αστρική ενέργεια.

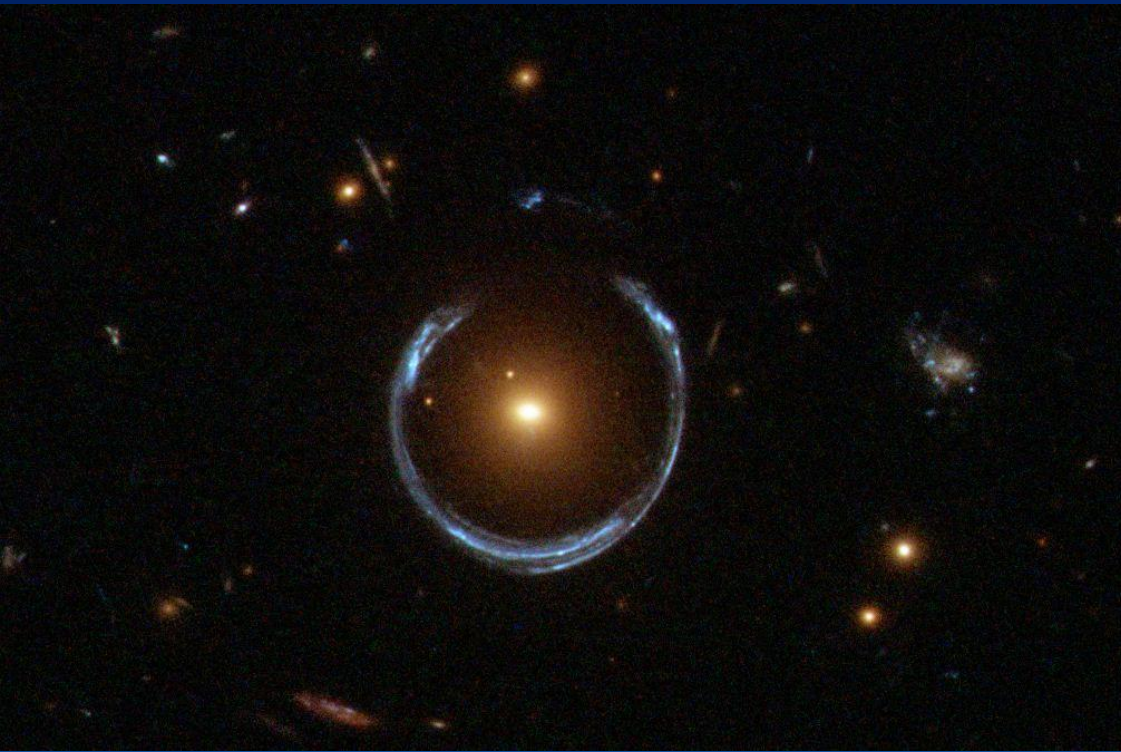


1915: Γενική Θεωρία Σχετικότητας (ΓΘΣ)

- Πρόβλημα: ΚΑΝΕΝΑ!
- Άποψη του Einstein: ισοδυναμία ΟΛΩΝ των συστημάτων αναφοράς, αδρανειακών ή όχι.
- Λόγω της αρχής της ισοδυναμίας, θα έπρεπε να περιλαμβάνει και τη βαρύτητα!
- Μαθηματικές δυσκολίες:
 - Marcel Grossman (βοήθεια σε τανυστικό λογισμό)
 - David Hilbert (σεμινάρια του Einstein στο Göttingen, καλοκαίρι του 1915).

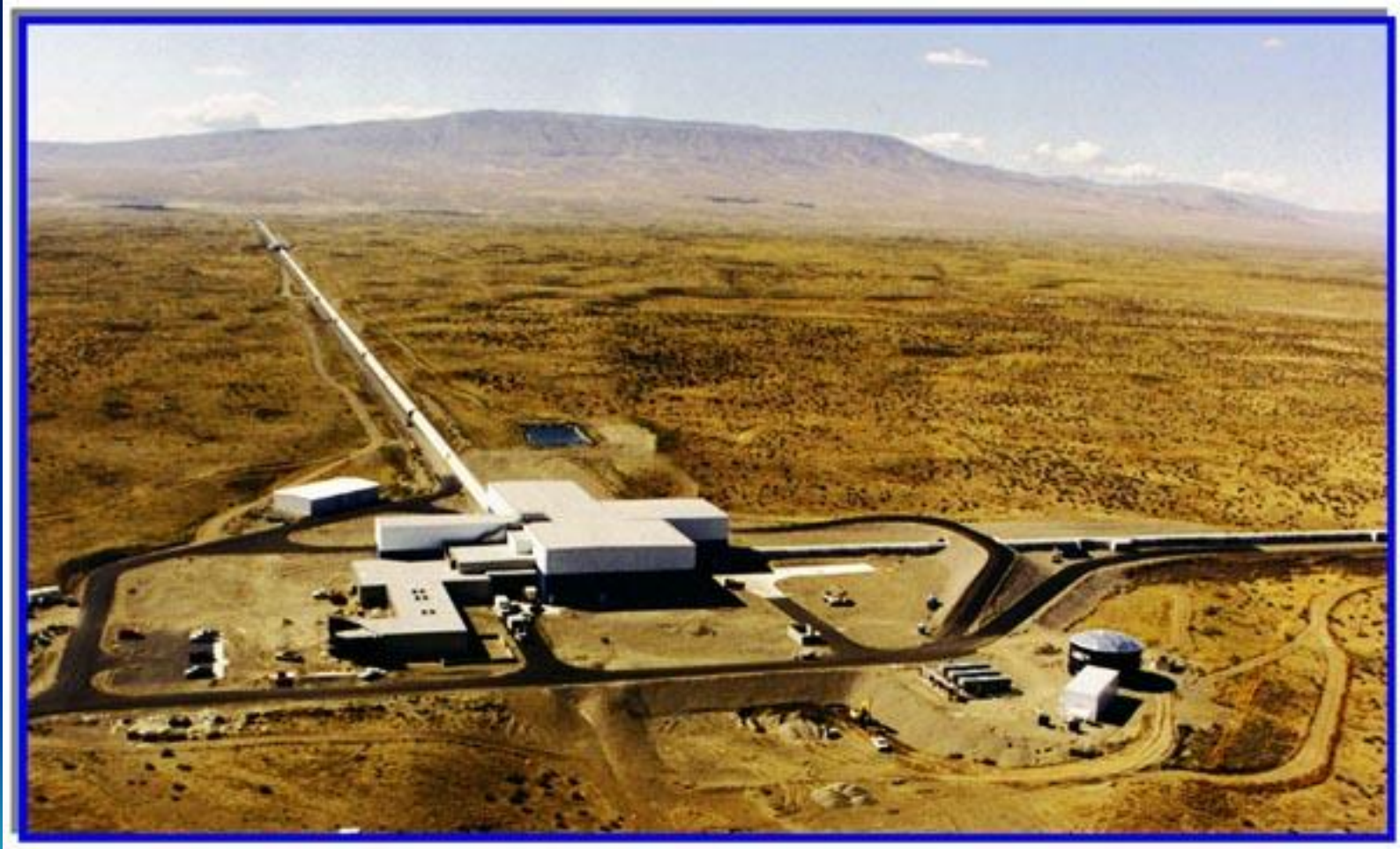


Βασικές προβλέψεις της ΓΘΣ



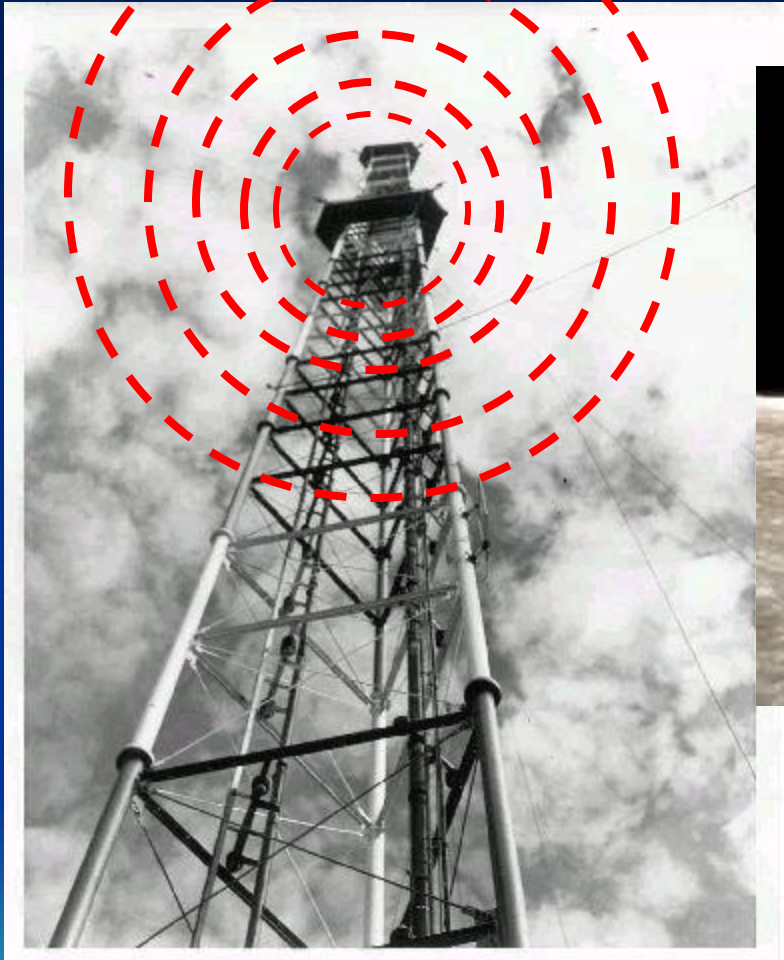
- Καμπύλωση του φωτός
 - Αμφιλεγόμενη παρατήρηση του Eddington το 1919.
 - Σήμερα: βαρυτικοί φακοί.

Βασικές προβλέψεις της ΓΘΣ - II



Βαρυτικά κύματα (όχι ακόμη παρατηρημένα), LIGO

Η δύναμη της αναλογίας



Η επιτάχυνση **φορτίων** παράγει Η/Μ κύματα, σύμφωνα με τον Maxwell και τον Hertz.



Δεν θα έπρεπε και η επιτάχυνση **μαζών**, όπως στο σύστημα Γης-Σελήνης, να παράγει βαρυτικά κύματα;

Σημαντική διαφορά: υπάρχουν ΔΥΟ είδη ηλεκτρικού φορτίου, αλλά μόνο ΕΝΑ βαρυτικό «φορτίο».

Οι αναλογίες δεν δουλεύουν πάντα...

Χρειάστηκε κάποιος χρόνος για να αποκτήσουμε καθαρή εικόνα!



Howard Percy Robertson



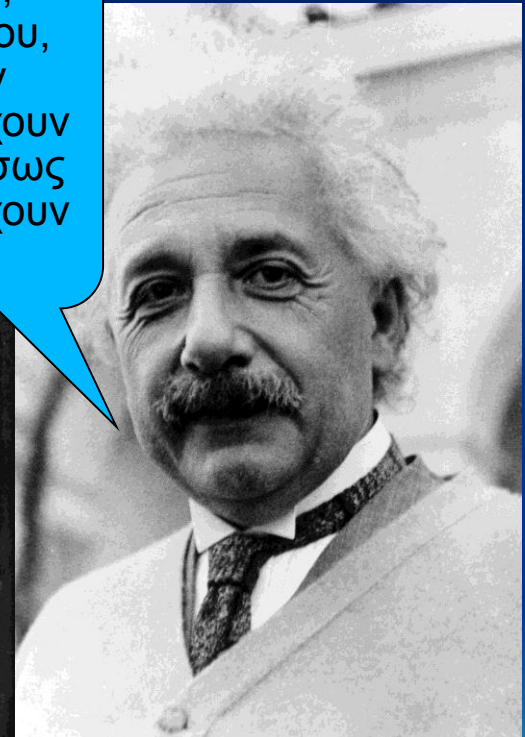
Arthur Stanley Eddington

Υπάρχουν

Αμφιβάλλω

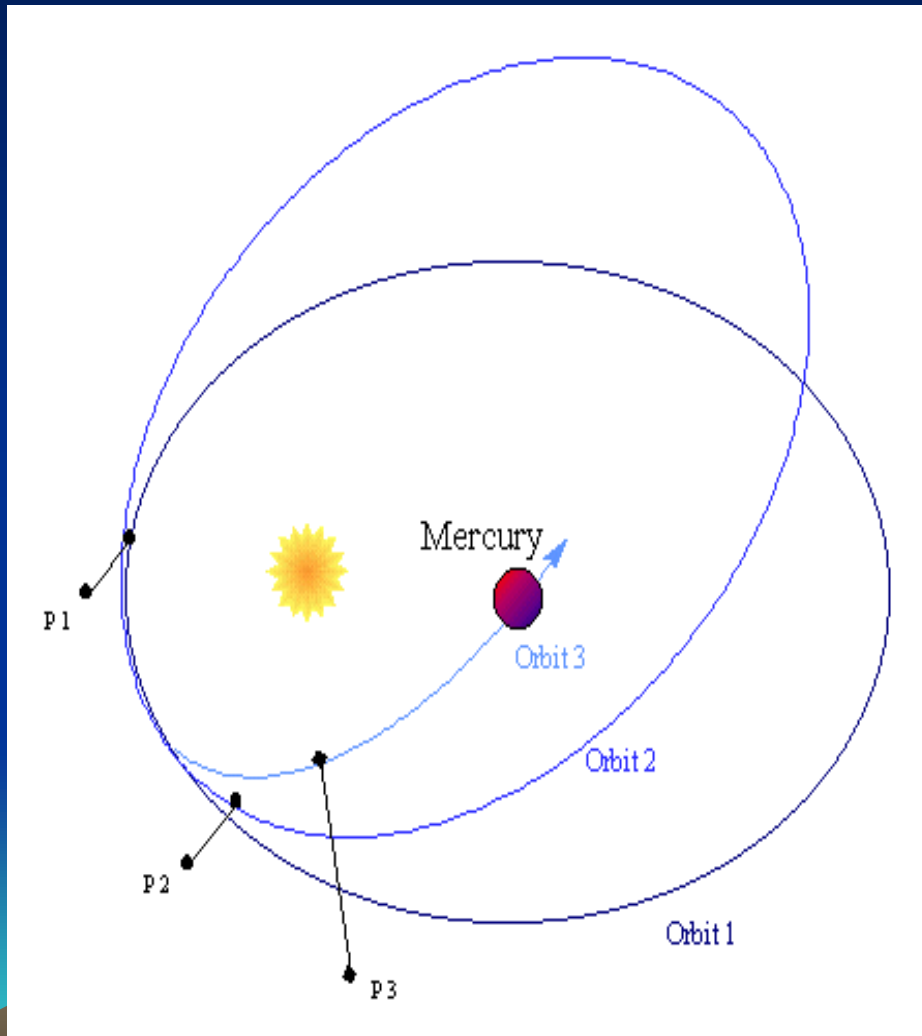
Δεν
υπάρχουν
...
υπάρχουν

Όχι,
στάσου,
δεν
υπάρχουν
... ή ίσως
υπάρχουν



Albert Einstein

Βασικές προβλέψεις της ΓΘΣ - III

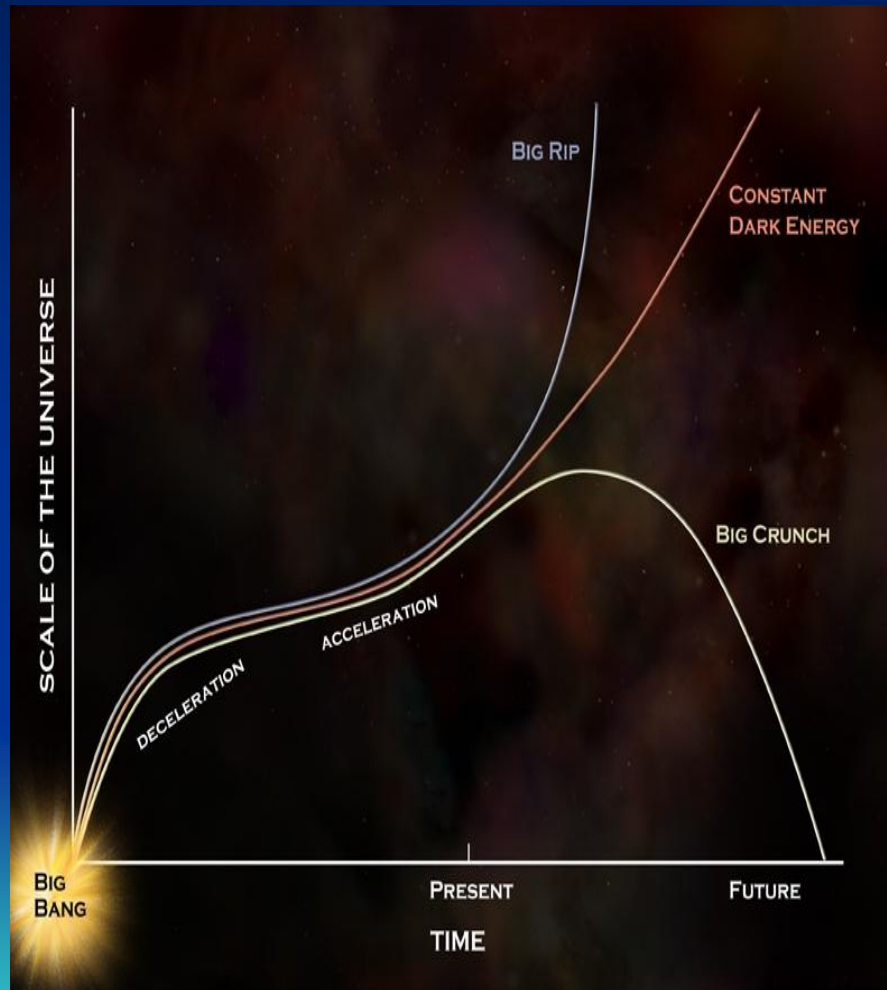


- Μετάπτωση του περιηλίου του Ερμή: διαφορά μεταξύ της μετρούμενης και της υπολογιζόμενης (μέσω της θεωρίας Laplace-Lagrange).
- Ροή του χρόνου εξαρτώμενη από το βαρυτικό πεδίο (επιβεβαιωμένη από μετρήσεις σε δορυφόρους - GPS).

Ο μυστηριώδης κόσμος των μελανών οπών

- Οι μελανές οπές «ανακαλύφθηκαν» από τον K. Schwarzschild το 1916
 - αλλά «έγιναν κατανοητές» από τον Finkelstein μόλις το 1958
 - και «βαφτίστηκαν» από τον J.A. Wheeler το 1967
- Παρατηρητές απομακρυσμένοι και σε ελεύθερη πτώση βλέπουν διαφορετικές «πραγματικότητες».
- Ποια από τις δύο είναι η «αληθινή»;
 - Και οι δύο, αφού οι δύο παρατηρητές δεν μπορούν να ανταλλάξουν πληροφορίες για το τι έχουν δει!
- Τα πράγματα είναι ακόμη χειρότερα στην Κβαντική βαρύτητα, όπου το αξίωμα της συμπληρωματικότητας περιπλέκει την κατάσταση:
 - Μια μελανή οπή είναι ψυχρή ή θερμή;
 - Εξαρτάται από το ΠΟΥ βρίσκεται ο παρατηρητής!
 - Αυτός που «πέφτει» ελεύθερα την βλέπει καυτή
 - Ο μακρινός παρατηρητής την βλέπει ψυχρή

Αναπάντεχα αποτελέσματα της ΓΘΣ



- Κοσμολογία:
Διαστολή του
Σύμπαντος –
κοσμολογική σταθερά
 Λ («η μεγαλύτερη
γκάφα» της ζωής του
– ή μήπως όχι;).
- Μελανές οπές (Ο
Einstein δεν πίστευε
στην ύπαρξή τους!).
- Γενίκευση της
Θερμοδυναμικής.

Μεταγενέστερα χρόνια



ALBERT EINSTEIN OG NIELS BOHR, 1930,
SOLVAY KONGRES I BRUXELLES,
FOTOGRAFERET AF PAUL EHRENFEST

- 1920-1935: Διαμάχη για την «ερμηνεία» των μαθηματικών αποτελεσμάτων της QM
 - Einstein: «Πιστεύω ότι Αυτός (ο Θεός) δεν παίζει ζάρια»."
 - Bohr: «Albert, πάψε να λες στον Θεό τι να κάνει!"»

1935 – 1955: Institute for Advanced Study, Princeton



- Μαθητές
 - Leopold Infeld (Βιβλίο: “The Evolution of Physics: From Early Concept to Relativity and Quanta” – μισθός από τον Einstein).
 - Παράδοξο Einstein – Podolsky – Rosen (παράδοξο ή όχι, έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά!).
- Θεωρία Ενοποιημένου Πεδίου:
 - Δεν έχει επιτευχθεί μέχρι σήμερα