

100 ΧΡΟΝΙΑ ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΤΕΡΓΙΟΥΛΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



Θεσσαλονίκη, 3/5/2015

Περιεχόμενα

1. Ιστορική αναδρομή
2. Εφαρμογές στην Αστροφυσική
3. Επεκτάσεις της ΓΘΣ - Πειραματικοί έλεγχοι
4. Βαρυτικά κύματα
5. Τεχνολογικές εφαρμογές

1. Ιστορική αναδρομή

Η Ειδική Θεωρία Σχετικότητας (ΕΘΣ)

1905: ο Einstein θεμελίωσε την ΕΘΣ με τα εξής δύο αξιώματα:



1. Δυναμικό αξίωμα (Αρχή της Ειδικής Σχετικότητας):

Όλοι οι νόμοι της φυσικής είναι ίδιοι για κάθε αδρανειακό παρατηρητή.

2. Κινηματικό αξίωμα:

Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι σταθερή και ίση με $299.792.458 \text{ m/s}$ για όλους τους παρατηρητές.

Συνέπειες του κινηματικού αξιώματος της ΕΘΣ

1. Ο **χρόνος** και το **μήκος** είναι **σχετικές έννοιες** (εξαρτώνται από την ταχύτητα του παρατηρητή που κάνει τη μέτρηση).
2. Δυο γεγονότα που είναι ταυτόχρονα ως προς έναν παρατηρητή, **δεν είναι ταυτόχρονα** ως προς κάποιον άλλο παρατηρητή με διαφορετική ταχύτητα.
3. **Σύνθεση ταχυτήτων**: Αν ένα αντικείμενο έχει **ταχύτητα V'** ως προς κινούμενο (με ταχύτητα **v**) παρατηρητή, τότε **η ταχύτητά του V ως προς έναν ακίνητο παρατηρητή είναι:**

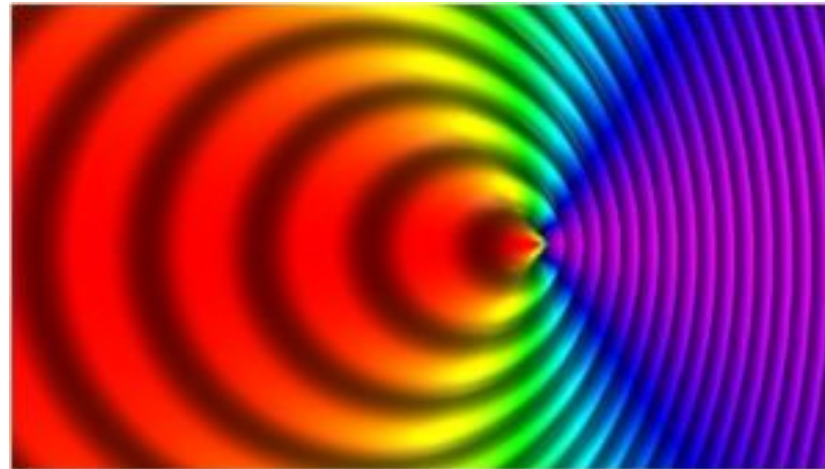
$$V = \frac{V' + v}{1 + vV'/c^2}$$

αν $V' \parallel v$ (στο όριο χαμηλών ταχυτήτων έχουμε την Νευτώνεια σύνθεση ταχυτήτων).

Συνέπειες του κινηματικού αξιώματος της ΕΘΣ

4. **Φαινόμενο Doppler:** Αν ένα Η/Μ κύμα έχει συχνότητα f' ως προς έναν κινούμενο παρατηρητή, τότε η συχνότητα f που μετρά ένας ακίνητος παρατηρητής είναι $f = \gamma f' (1 - v/c)$ (για διάδοση κατά μήκος της κίνησης).

μετάθεση προς
το **ερυθρό**



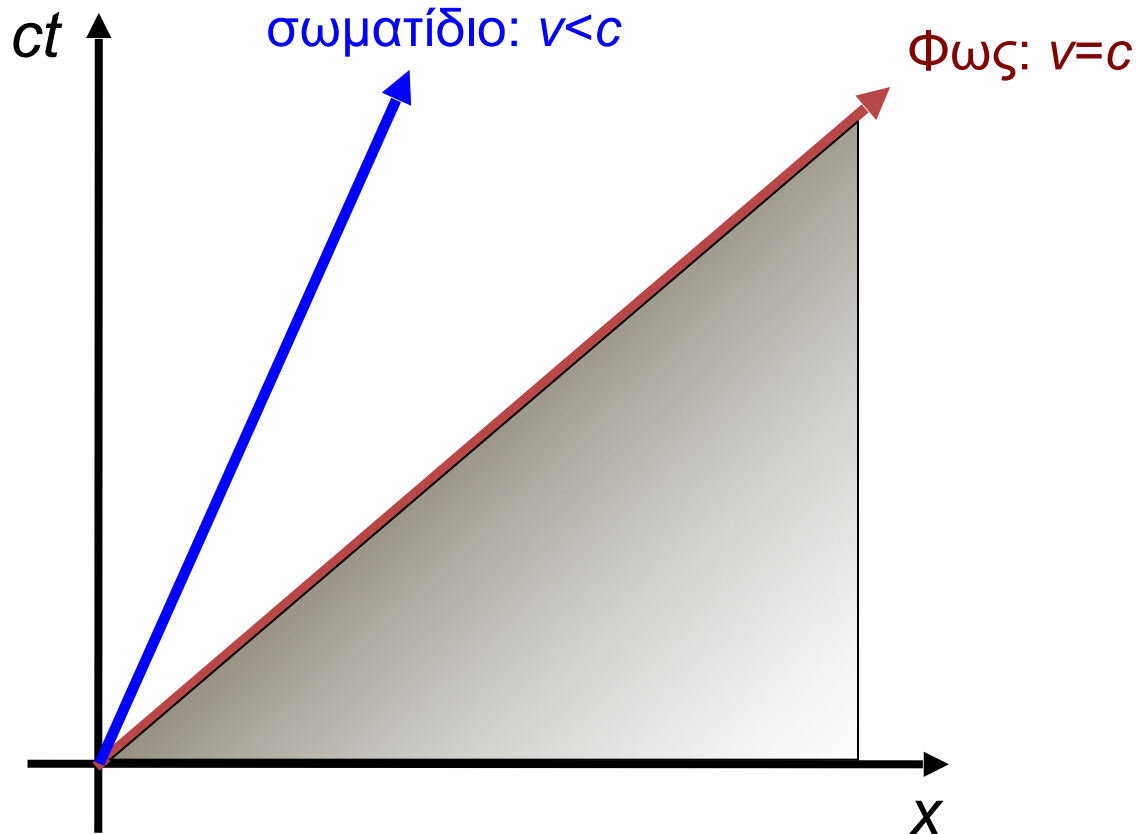
μετάθεση προς
το **ιώδες**

$0.7c$
→

όπου $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ είναι ο παράγοντας Lorentz.

Ο χωροχρόνος της ΕΘΣ

1907: Minkowski. Ο **χώρος** και ο **χρόνος** μπορεί να θεωρηθούν ως συντεταγμένες ενός **4-διάστατου χωροχρόνου**.

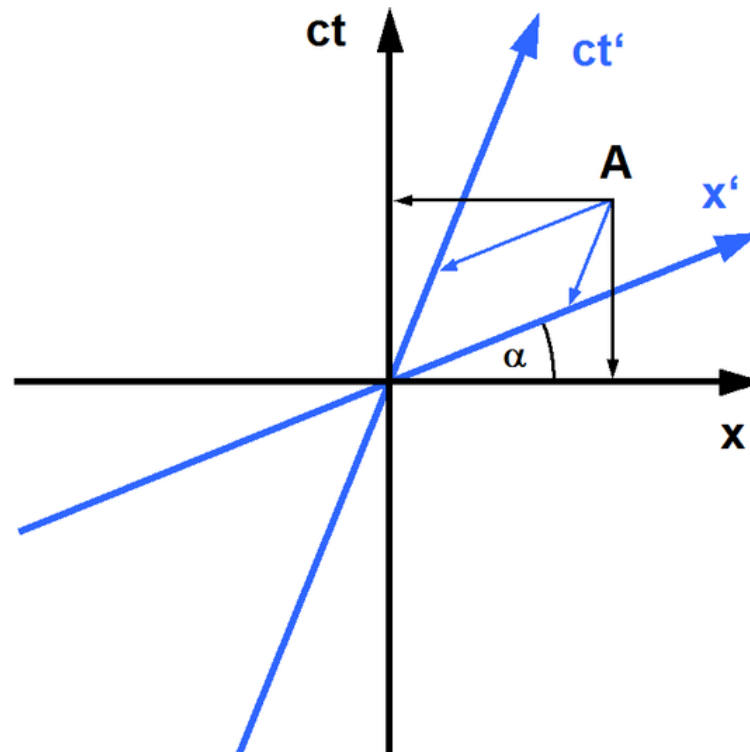


Χωροχρονικό μήκος

Δυο παρατηρητές με διαφορετικές ταχύτητες θα μετρήσουν διαφορετικό χωρικό διάστημα Δx και διαφορετικό χρονικό διάστημα Δt μεταξύ δυο γεγονότων.

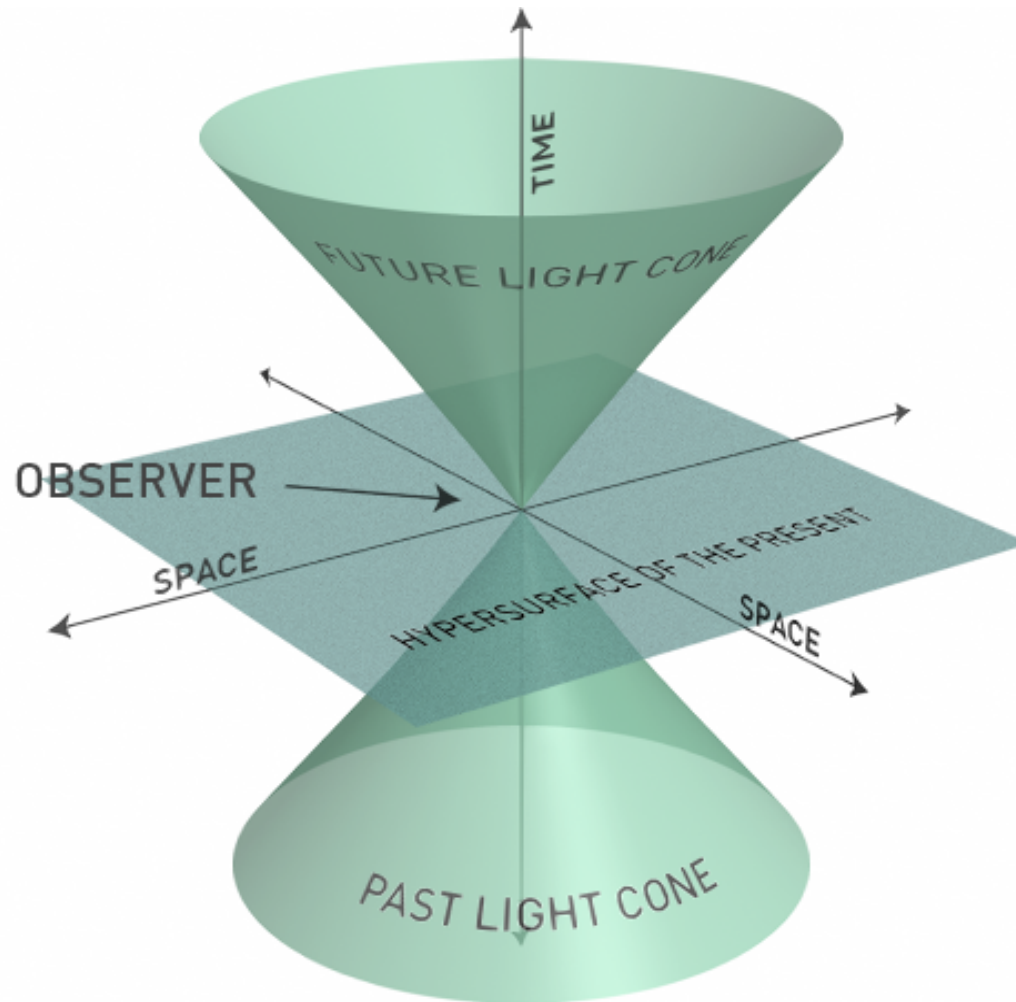
Όμως και οι δυο μετρούν το ίδιο χωροχρονικό μήκος:

$$\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2$$



Ο κώνος φωτός

Σε 2+1 διαστάσεις, τα **φωτόνια** μπορούν να κινούνται μόνο πάνω σε μια επιφάνεια που έχει σχήμα **κώνου**. Σωματίδια με **μάζα**, κινούνται μόνο **εσωτερικά** του κώνου φωτός.



Συνέπειες του δυναμικού αξιώματος της ΕΘΣ

1. Σχετικιστική ορμή: $p = \gamma m_0 v$

2. Σχετικιστική ενέργεια:

$$E = \gamma m_0 c^2 \rightarrow m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2$$

(στο όριο χαμηλών ταχυτήτων προκύπτει το άθροισμα της ενέργειας ηρεμίας και της κινητικής ενέργειας).

3. Σχετικιστική μάζα: $m = \gamma m_0$

Πειραματικός έλεγχος της ΕΘΣ

Έλεγχος της διαστολής του χρόνου. Σε πρόσφατο πείραμα του NIST (Chou et al. 2010), χρησιμοποιώντας “ρολόγια” ακτίνων laser, επιβεβαιώθηκε ακόμη και σε ταχύτητες της τάξης των 40 km/h.

Έλεγχος της αύξησης της σχετικιστικής μάζας με την ταχύτητα. Χρησιμοποιώντας επιταχυντές σωματιδίων επιβεβαιώθηκε ότι η σχετικιστική μάζα αυξάνει και τείνει στο άπειρο όταν η ταχύτητα τείνει στην ταχύτητα του φωτός (Greene et al. 1991).

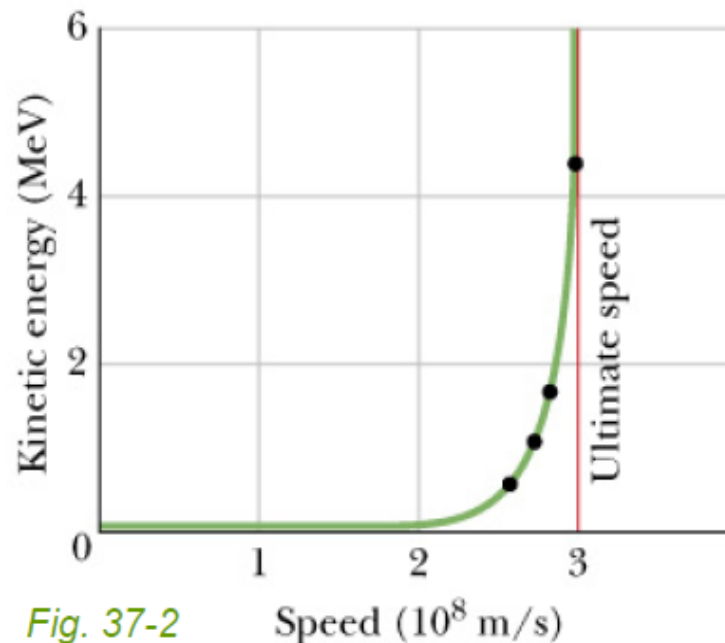


Fig. 37-2

Speed (10^8 m/s)

(Bertozzi 1964)

Νευτώνεια βαρύτητα

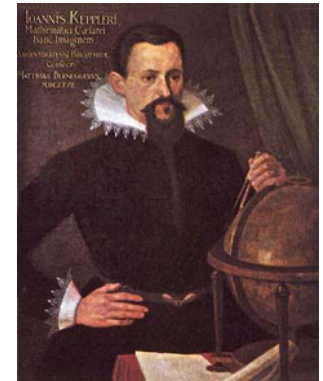
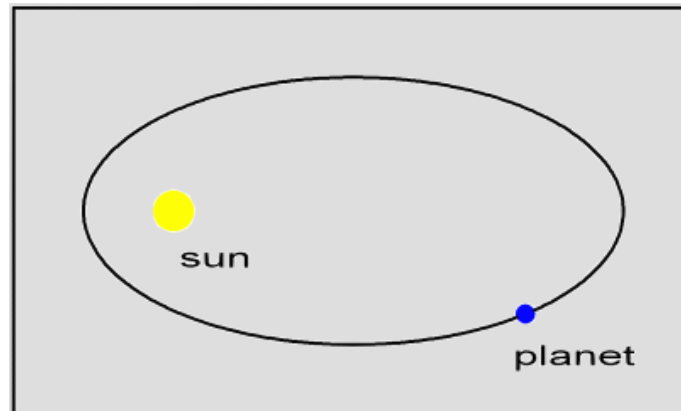
1687: Ο Νεύτωνας θεώρησε ότι η βαρύτητα δρα ακαριαία σε οποδήποτε μεγάλες αποστάσεις.

$$F = \frac{G m_1 m_2}{r^2}$$

(ο βαρυτικό δυναμικό Φ δίνεται από μια ελλειπτική εξίσωση)

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G\rho$$

Έτσι εξήγησε τους νόμους των πλανητικών τροχιών που είχε βρει εμπειρικά ο Κέπλερ (1609)

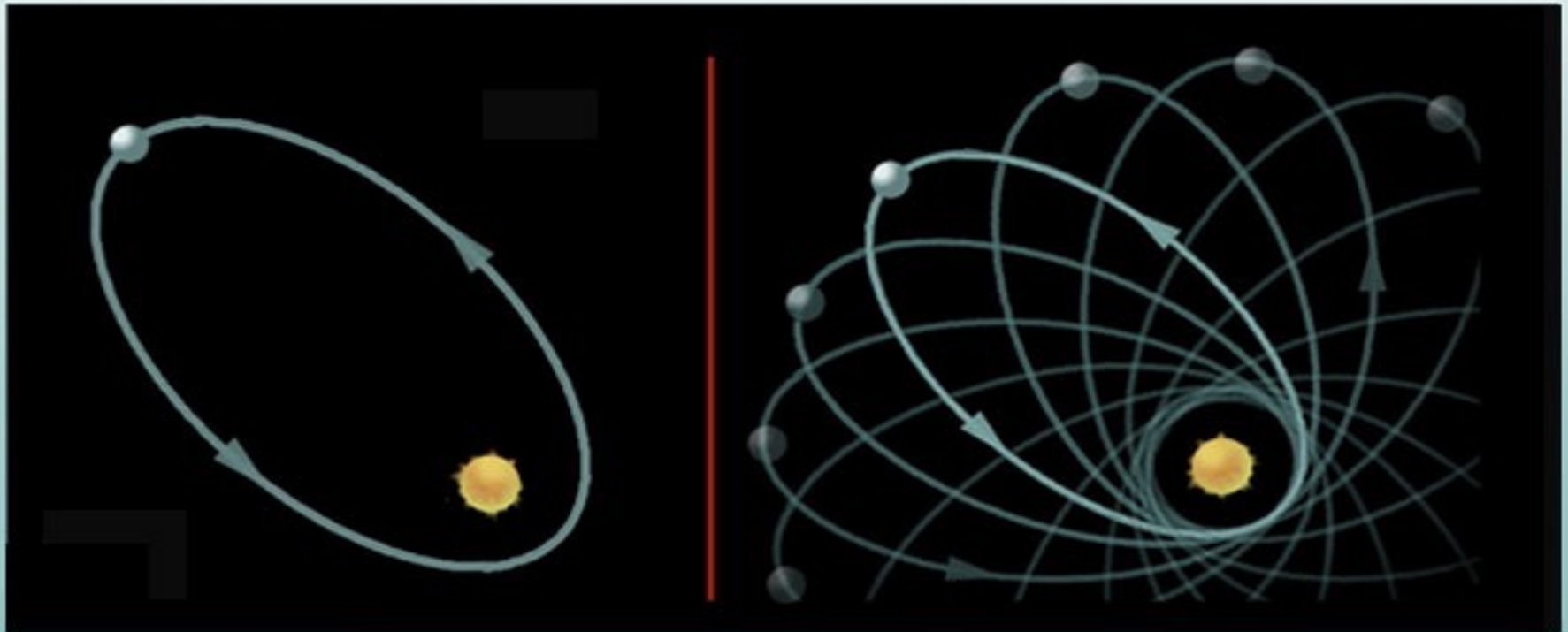


Προβλήματα της Νευτώνειας βαρύτητας

1859: *Le Verrier*: Το περιήλιο της ελλειπτικής τροχιάς του Ερμή μετατίθεται κατά ένα ανεξήγητο $38''$ /αιώνα!



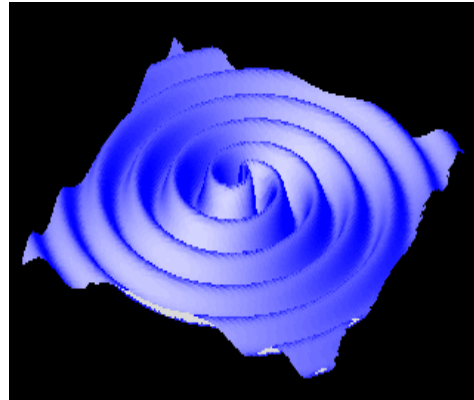
MERCURY'S ORBIT



Προβλήματα της Νευτώνειας βαρύτητα

1900: ο Lorentz προτείνει ότι η δύναμη της βαρύτητας δε μεταδίδεται ακαριαία (όπως προβλέπει η Νευτώνεια θεωρία) αλλά με την ταχύτητα του φωτός.

1905: ο Poincaré προτείνει την ύπαρξη βαρυτικών κυμάτων.



Έπρεπε να βρεθεί μια νέα θεωρία για τη βαρύτητα, η οποία να περιγράφεται από κυματικές εξισώσεις (υπερβολικού τύπου).

$$-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \nabla^2 \Phi = 4\pi G\rho$$

Η αρχή της ισοδυναμίας

6^{ος} αιώνας: Ο Ιωάννης Φιλόπονος περιγράφει ότι

«αν αφήσει κανείς ταυτόχρονα δυο σώματα με διαφορετικές μάζες να πέσουν από το ίδιο ύψος, θα φτάσουν στο έδαφος στον ίδιο χρόνο»

17^{ος} αιώνας: Γαλιλαίος: πειραματική επαλήθευση

Το πείραμα αυτό είναι **ισοδύναμο** με την υπόθεση ότι η **μάζα αδράνειας** m_α είναι ίση με τη βαρυτική **μάζα** m_β .

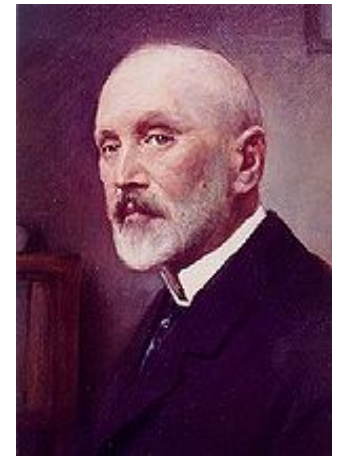
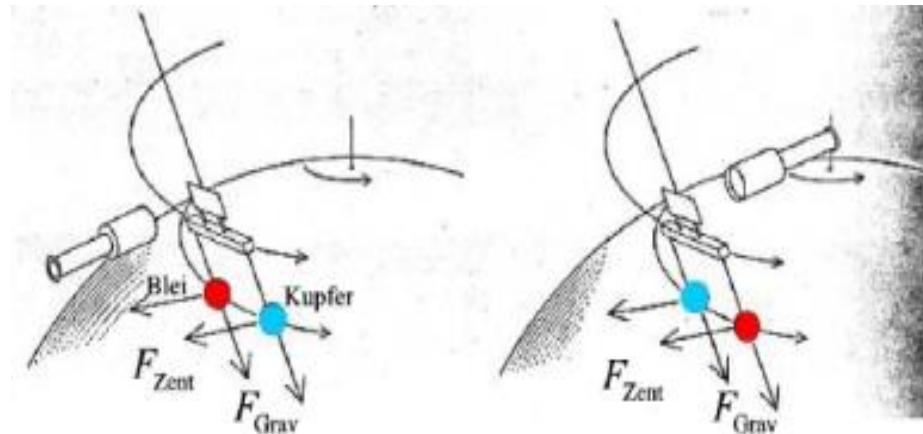
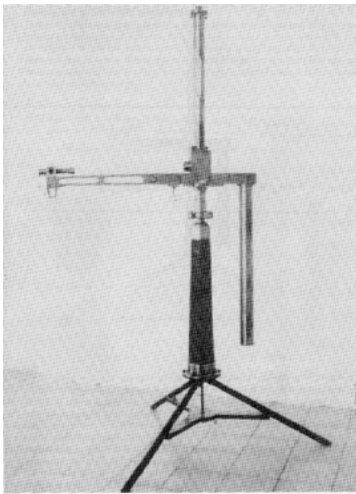
$$F = m_\alpha a = G \frac{m_\beta M}{r^2}$$

$$\Rightarrow a = \left(\frac{m_\beta}{m_\alpha} \right) \frac{G M}{r^2}$$

Αν $m_\alpha = m_\beta$ τότε η επιτάχυνση είναι ανεξάρτητη της μάζας.

Η αρχή της ισοδυναμίας

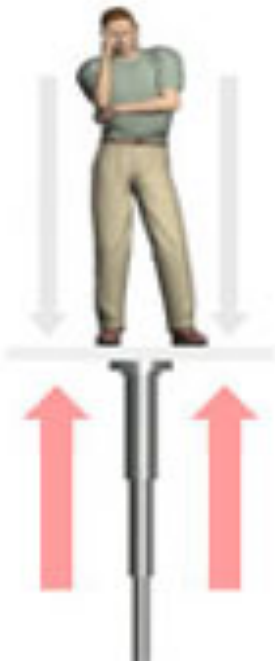
1880: Eötvös: πειραματική επαλήθευση
μάζα αδράνειας = βαρυτική μάζα
με σχετική ακρίβεια 10^{-8} .



Η αρχή της ισοδυναμίας

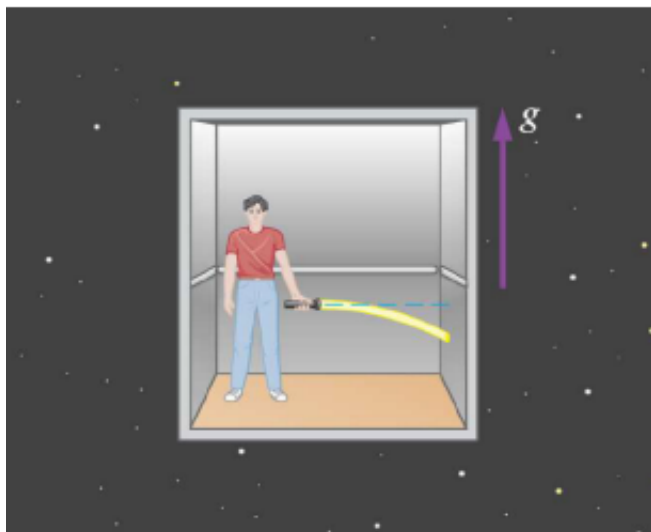
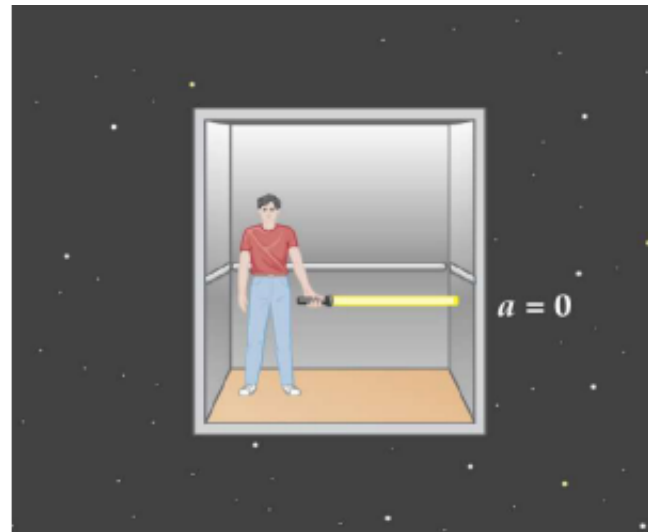
1907: Ο Einstein συνειδητοποιεί ότι η βαρύτητα δρα ισοδύναμα ως επιτάχυνση.

Αντικαθιστά τους αδρανειακούς παρατηρητές της Νευτώνειας θεωρίας, από παρατηρητές που πέφτουν ελεύθερα σε ένα πεδίο βαρύτητας.

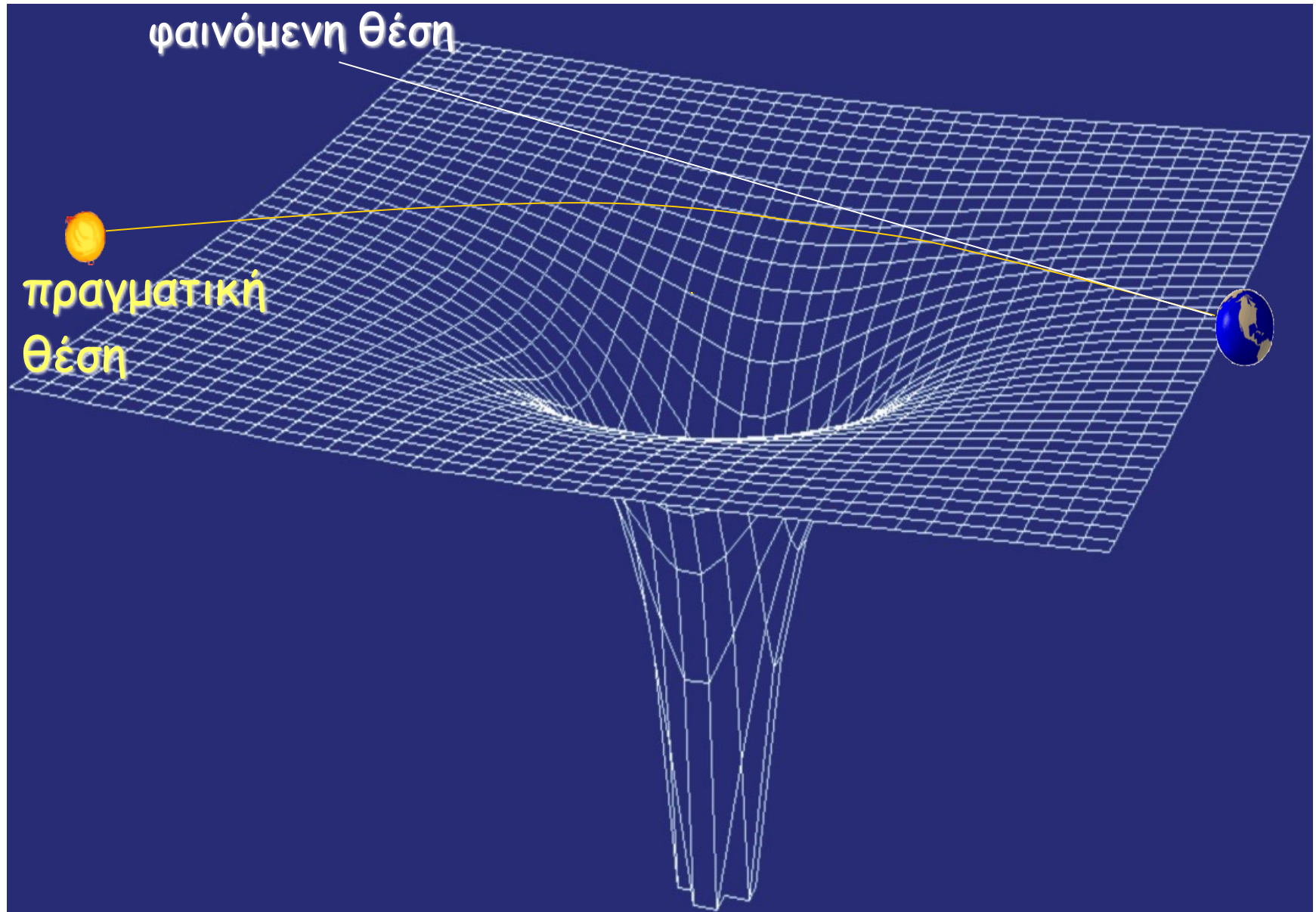


Η αρχή της ισοδυναμίας

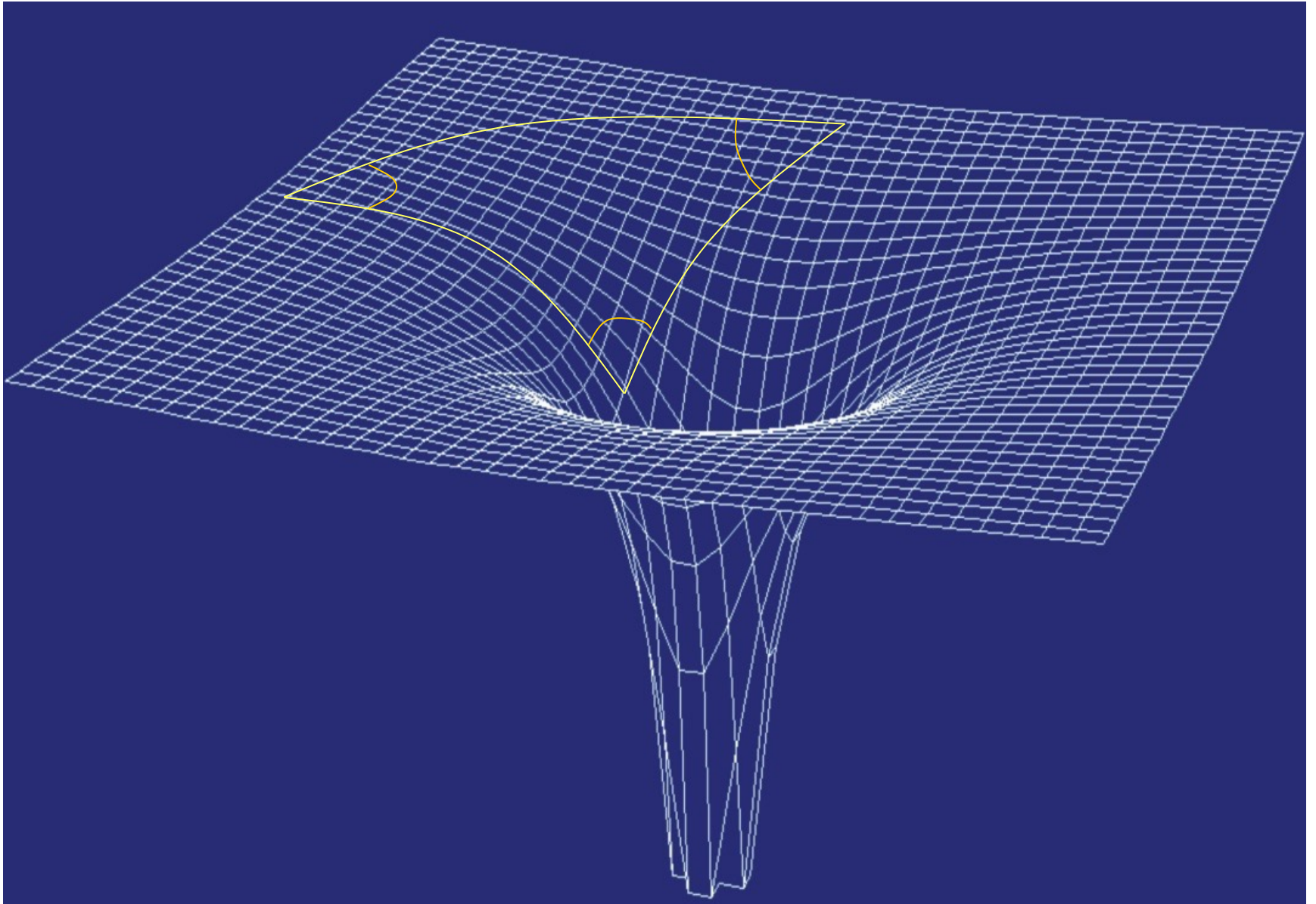
1907: Ο Einstein αποδεικνύει με βάση την αρχή της ισοδυναμίας ότι η τροχιά των φωτονίων καμπυλώνεται από το βαρυτικό πεδίο.



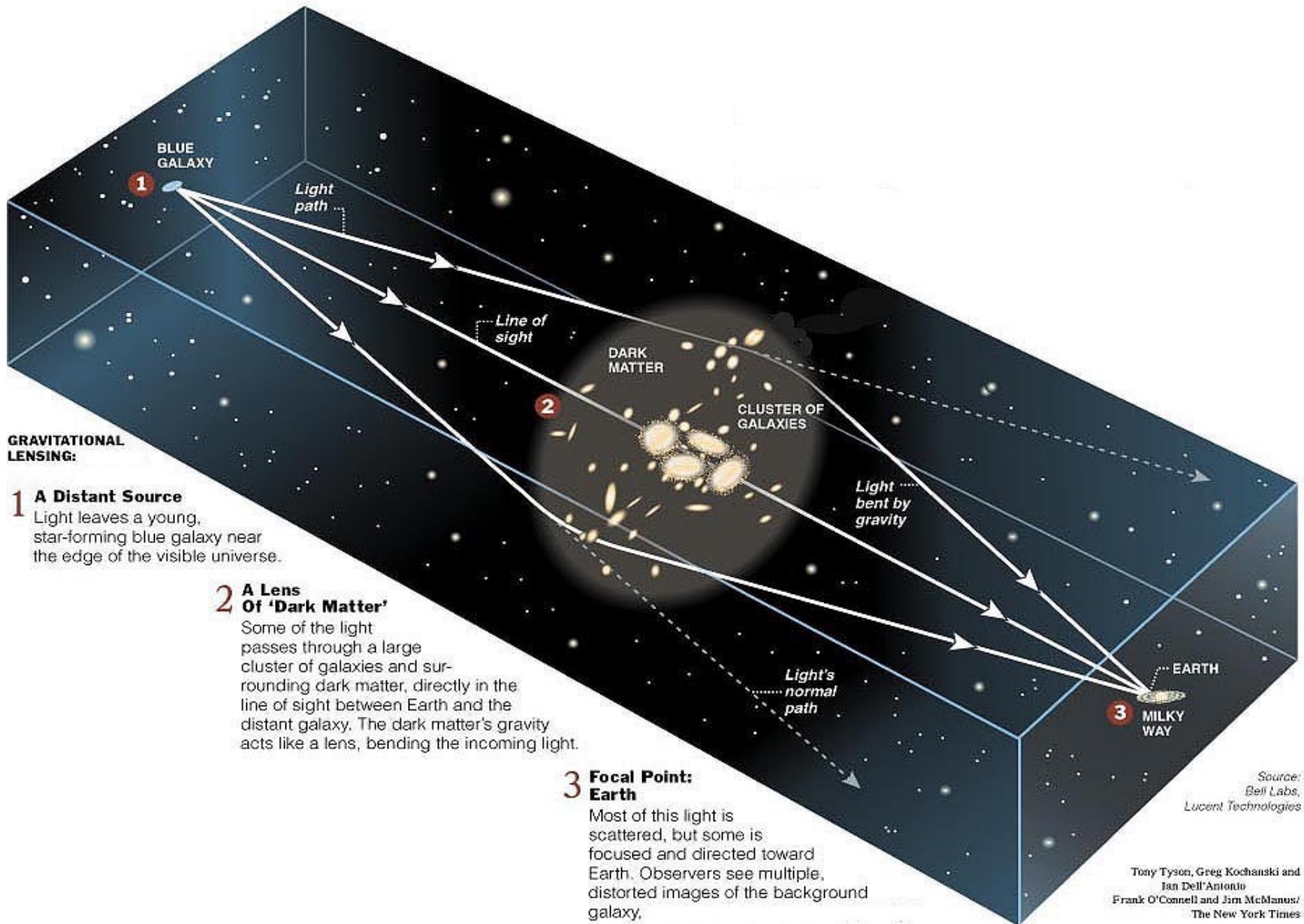
Η καμπύλωση της τροχιάς των φωτονίων



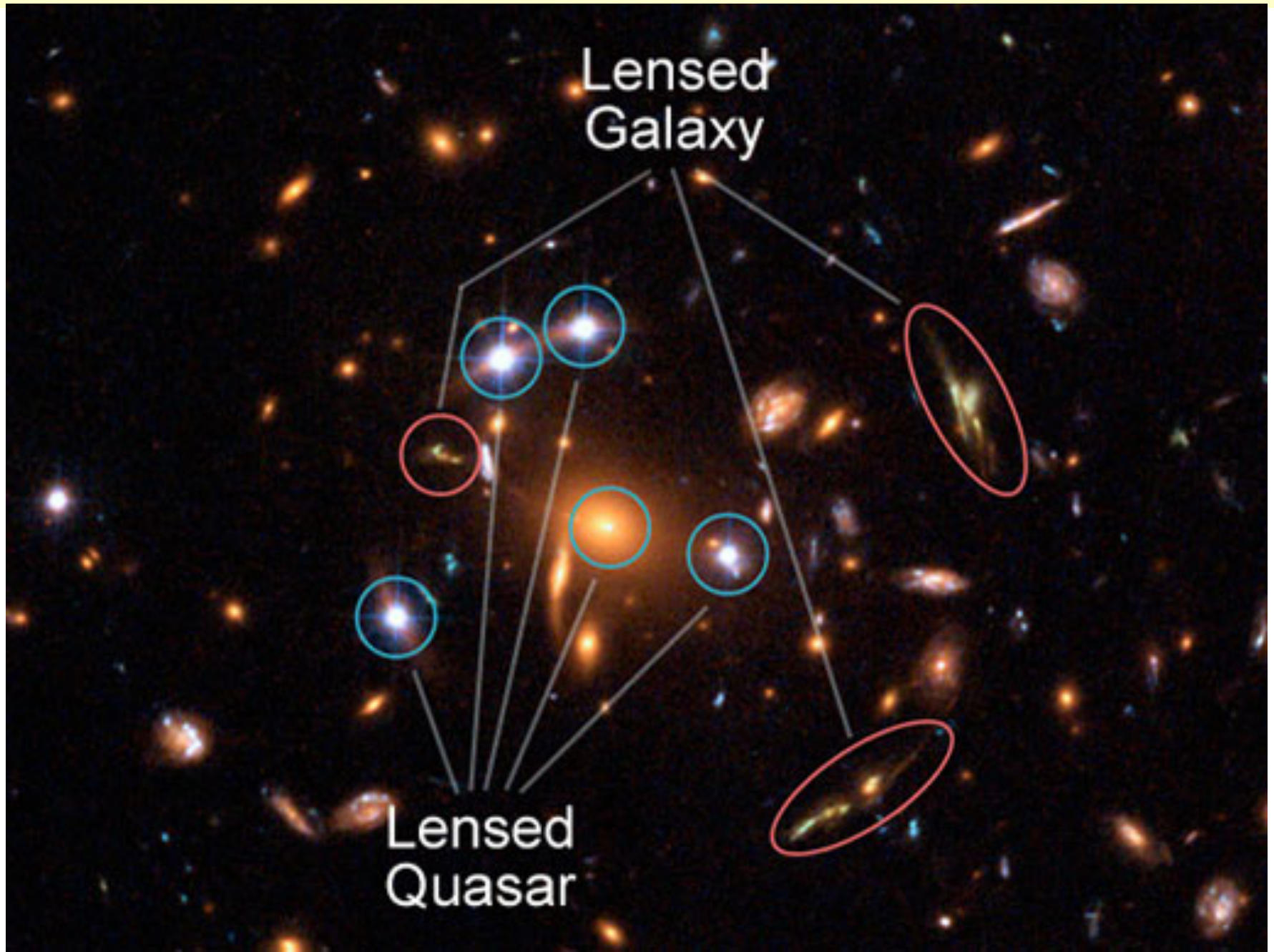
Η καμπύλωση του χωροχρόνου



Βαρυτικοί φακοί

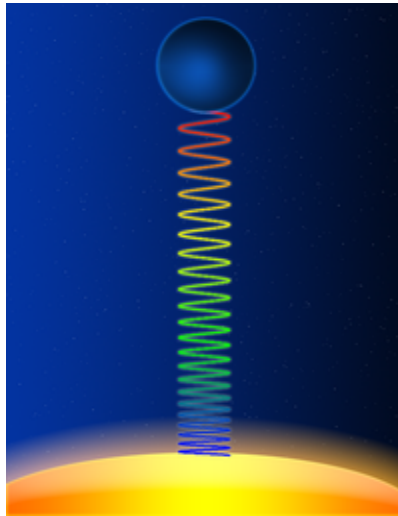


Βαρυτικοί φακοί



Βαρυτική μετάθεση της συχνότητας φωτονίων

1907: Ο Einstein αποδεικνύει με βάση την αρχή της ισοδυναμίας ότι η **συχνότητα των φωτονίων ελαττώνεται όταν εξέρχονται** από βαρυτικά πεδία.



Επειδή με τη συχνότητα του φωτός μετράμε χρονικά διαστήματα, εμφανίζεται **βαρυτική διαστολή του χρόνου**.

Το φαινόμενο βρίσκει εφαρμογή κοντά στην **επιφάνεια αστέρων νετρονίων** και κοντά στον **ορίζοντα μελανών οπών**.

Σε πρόσφατο πείραμα του NIST μετρήθηκε η βαρυτική διαστολή του χρόνου ακόμη και σε **διαφορά ύψους 1m**.

Η αρχή σχετικότητας του Einstein

1912: Ο Einstein γενικεύει την αρχή της σχετικότητας:

*«Όλοι οι νόμοι της φυσικής πρέπει να είναι ίδιοι
για όλους τους παρατηρητές»*

(και για τους επιταχυνόμενους)

Καμπύλωση του χωροχρόνου

Το φως ανιχνεύει άμεσα τις ιδιότητες του χωροχρόνου. Εφ' όσον η τροχιά του φωτός **καμπυλώνεται**, η γεωμετρία του χωροχρόνου **δε μπορεί να είναι Ευκλείδεια** (επίπεδη).

Ο Einstein έμαθε από τον Grossmann για τη διαφορική γεωμετρία καμπύλων χώρων, που είχε ήδη θεμελιωθεί από τους **Riemann**, **Ricci** και **Levi-Civita**.



$$R_{ik,jl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 g_{il}}{\partial x^k \partial x^j} + \frac{\partial^2 g_{kj}}{\partial x^i \partial x^l} - \frac{\partial^2 g_{ij}}{\partial x^k \partial x^l} - \frac{\partial^2 g_{kl}}{\partial x^i \partial x^j} \right) + \sum_{\alpha, \beta=1}^n g^{\alpha\beta} (\Gamma_{kj,\alpha} \Gamma_{il,\beta} - \Gamma_{kl,\alpha} \Gamma_{ij,\beta}),$$

$$R_{ij} = \sum_{k,l=1}^n g^{kl} R_{ik,jl}$$

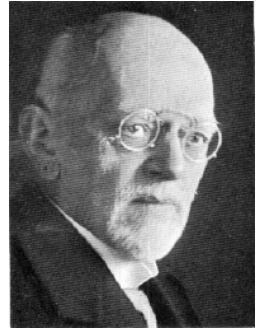
$$\varepsilon_{\alpha\beta\gamma\delta} = g \varepsilon^{\alpha\beta\gamma\delta}$$

Καμπύλωση του χωροχρόνου

1914: Ο Einstein προτείνει μια νέα (σχεδόν τελική) θεωρία βαρύτητας

1915: Ο Einstein επισκέπτεται το Πανεπιστήμιο του Göttingen, όπου παρουσιάζει τη θεωρία του στους εξέχοντες μαθηματικούς Hilbert και Klein.

1915: Οι Einstein και Hilbert προτείνουν ανεξάρτητα την τελική μορφή της νέας θεωρίας βαρύτητας.



$$\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} = \frac{1}{2} g^{\lambda\rho} \left(\frac{\partial g_{\rho\nu}}{\partial x^{\mu}} + \frac{\partial g_{\rho\mu}}{\partial x^{\nu}} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^{\rho}} \right)$$

$$R_{\sigma\mu\nu}^{\rho} = \partial_{\mu} \Gamma_{\sigma\nu}^{\rho} - \partial_{\nu} \Gamma_{\sigma\mu}^{\rho} + \Gamma_{\mu\lambda}^{\rho} \Gamma_{\sigma\nu}^{\lambda} - \Gamma_{\nu\lambda}^{\rho} \Gamma_{\sigma\mu}^{\lambda}$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$



Ο χωροχρόνος της ΓΘΣ

Οι όροι που συνθέτουν το στοιχειώδες μήκος **επηρεάζονται από τη μάζα-ενέργεια** που υπάρχει στο χώρο (από τη βαρύτητα και όλα τα άλλα είδη ενέργειας):

Η σχέση της ΕΘΣ

$$\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2$$

γίνεται:

$$d s^2 = -f(\Phi) c^2 \Delta t^2 + g(\Phi) \Delta x^2$$

όπου $f(\Phi)$ και $g(\Phi)$ είναι συναρτήσεις της μετρικής που εξαρτώνται από τα ενεργειακά πεδία.

Γενικότερα:

$$d s^2 = \sum_i \sum_j g_{ij} \Delta x^i \Delta x^j$$

Όπου g_{ij} είναι ένας πίνακας 4x4 (**μετρικός τανυστής**).

Οι εξισώσεις πεδίου της ΓΘΣ

Η **καμπυλότητα** του χωροχρόνου περιγράφεται από τον **τανυστή του Ricci** R_{ij} .

Όλες οι **μορφές ενέργειας** περιέχονται στον **τανυστή τάσης-ενέργειας-ορμής** T_{ij} .

Έτσι, εξίσωση Poisson της Νευτώνειας θεωρίας

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$$

αντικαθίσταται από τις **εξισώσεις πεδίου της ΓΘΣ**

$$R_{ij} - \frac{1}{2} R g_{ij} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ij}$$

οι οποίες εμπεριέχουν **κυματικές εξισώσεις** που περιγράφουν τη διάδοση βαρυτικών κυμάτων.

Η αρχή της ελάχιστης δράσης

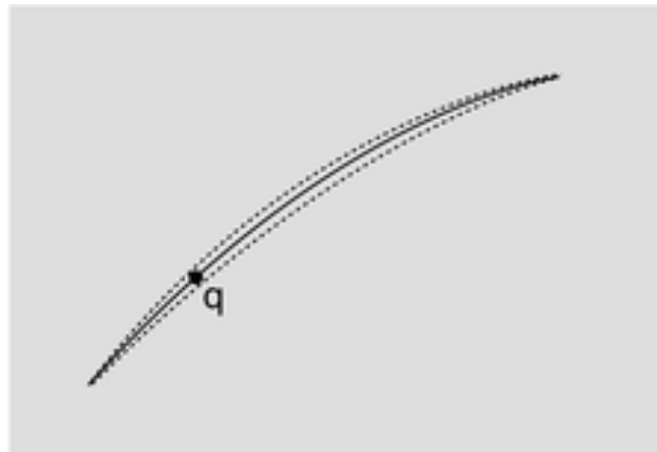
1^{ος} αιώνας π.Χ.: Ο Ήρων ο Αλεξανδρινός παρατηρεί πως

«το φως κατά την ανάκλασή του ακολουθεί τη συντομότερη δυνατή διαδρομή»



Οι εξισώσεις πεδίου της ΓΘΣ μπορούν να **εξαχθούν** από την **αρχή της ελάχιστης δράσης** (ορίζοντας κατάλληλα τη δράση).

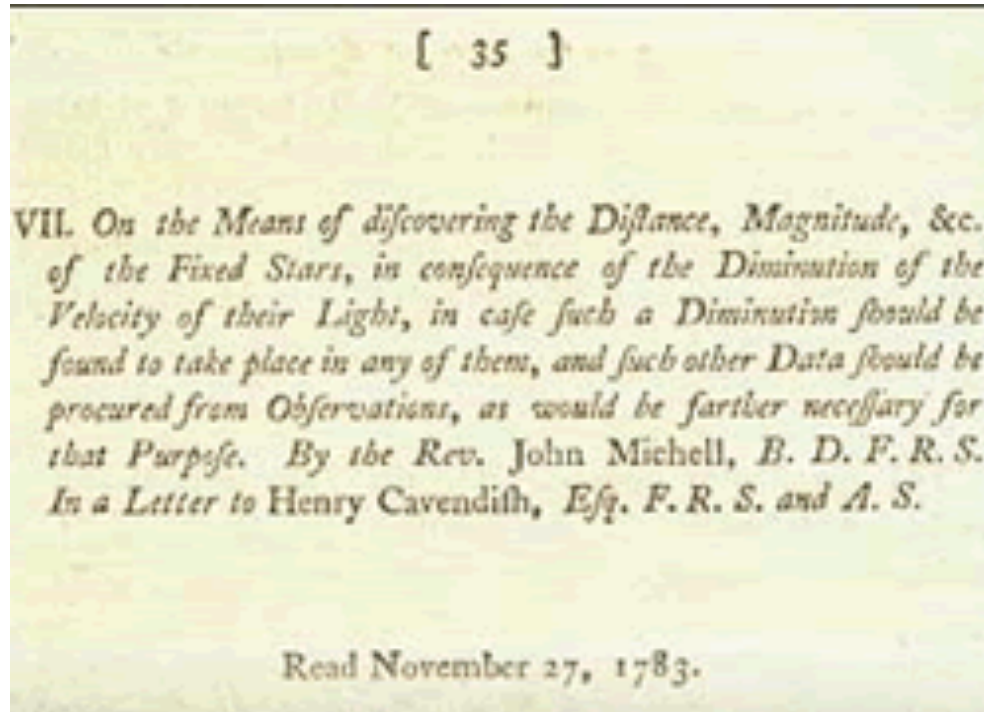
Έτσι, οι **τροχιές φωτονίων και σωματιδίων** στον καμπυλωμένο χωροχρόνο είναι **γεωδαισιακές καμπύλες** που ελαχιστοποιούν τη δράση.



2. Εφαρμογές στην Αστροφυσική

«Σκοτεινοί» αστέρες

1783: Ο John Michell προτείνει την έννοια του **σκοτεινού αστέρα**



«Εάν ένα σώμα είναι αρκετά συμπαγές, ώστε η **ταχύτητα διαφυγής** από την επιφάνειά του να είναι **ίση με την ταχύτητα του φωτός**, τότε αυτό **δε θα μπορεί να εκπέμπει φωτόνια.**»

Η έννοια αυτή αγνοήθηκε, όταν απορρίφθηκε η Νευτώνεια θεωρία της σωματιδιακής φύσης του φωτός.

Μελανές οπές στη ΓΘΣ

1916: Schwarzschild: Οι **σφαιρικά συμμετρικές** και **χρονικά ανεξάρτητες** εξισώσεις πεδίου της ΓΘΣ στο κενό έχουν μια **μοναδική λύση**, με μετρικό στοιχείο

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2$$



Η λύση αυτή περιλαμβάνει έναν **ορίζοντα γεγονότων** με ακτίνα

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

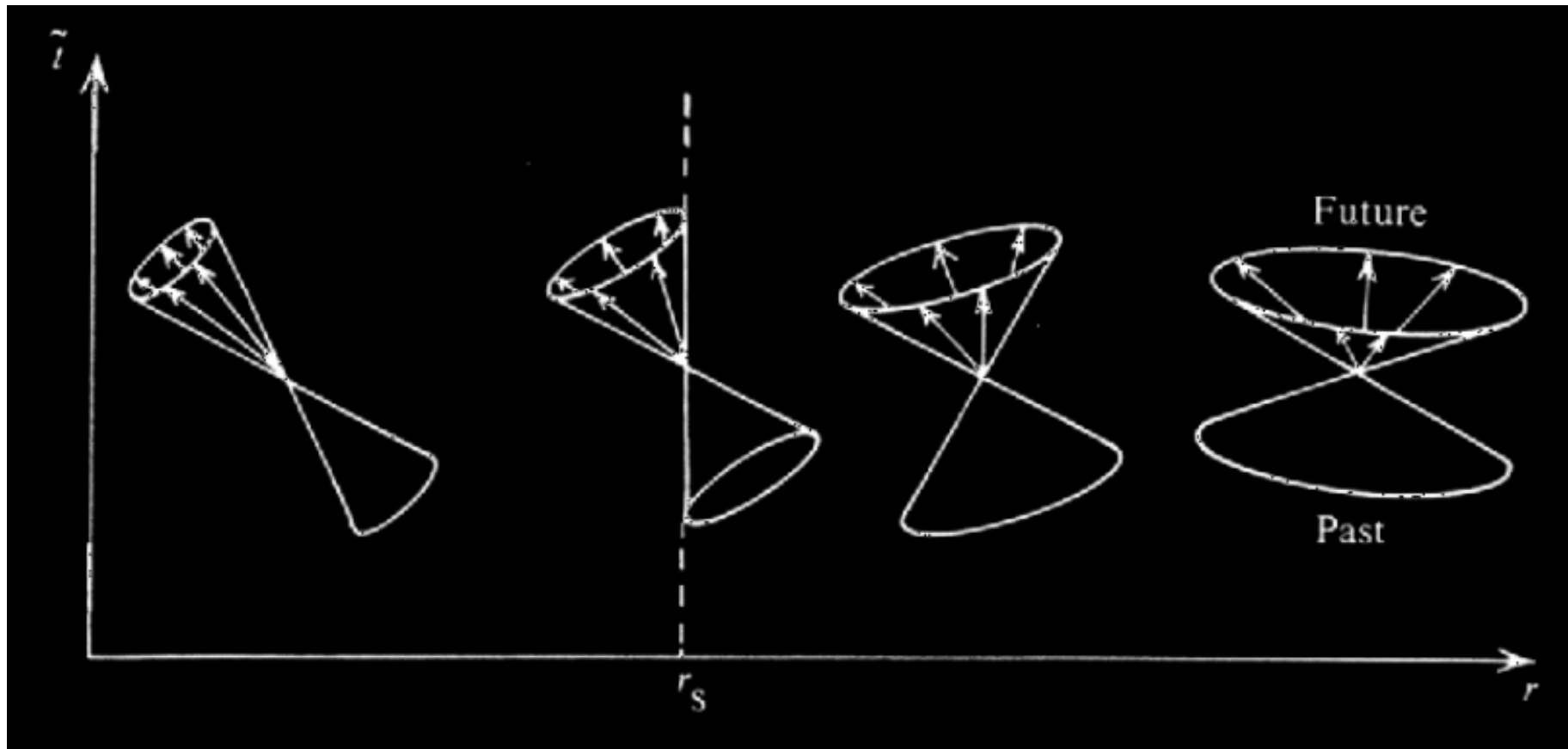
(**ακτίνα Schwarzschild**). Για ένα σώμα με μάζα όση ο Ήλιος:

$$R_s = 3\text{km}$$

Στην ακτίνα αυτή υπάρχει **άπειρη μετάθεση προς το ερυθρό** και ο **τοπικός χρόνος “παγώνει”** όπως τον μετρά ένας μακρινός παρατηρητής.

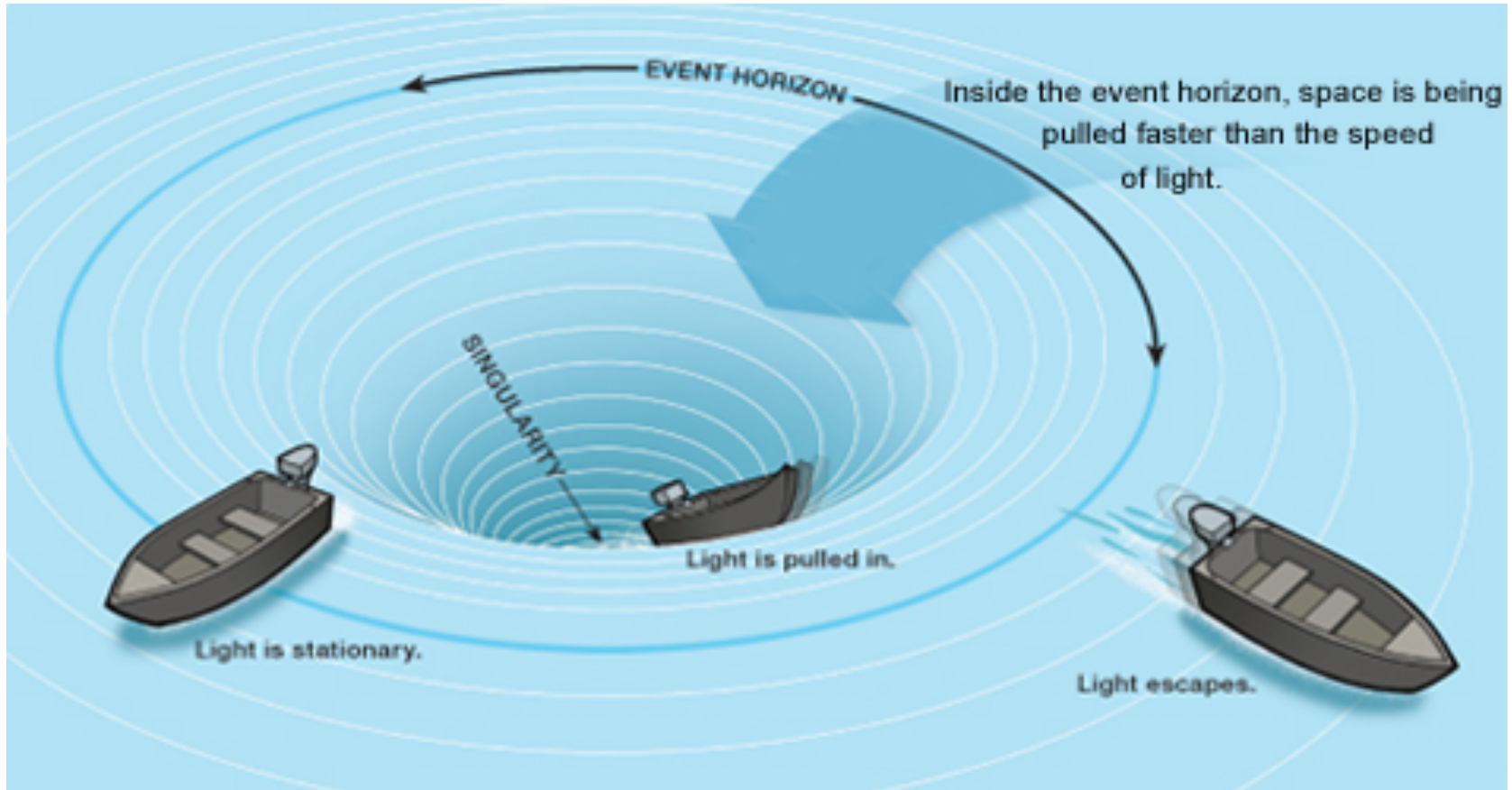
Ο κώνος φωτός κοντά στη μελανή οπή

Εντός της μελανής οπής, τόσο τα **εισερχόμενα**, όσο και τα **εξερχόμενα** φωτόνια κατευθύνονται προς το **κέντρο** της.

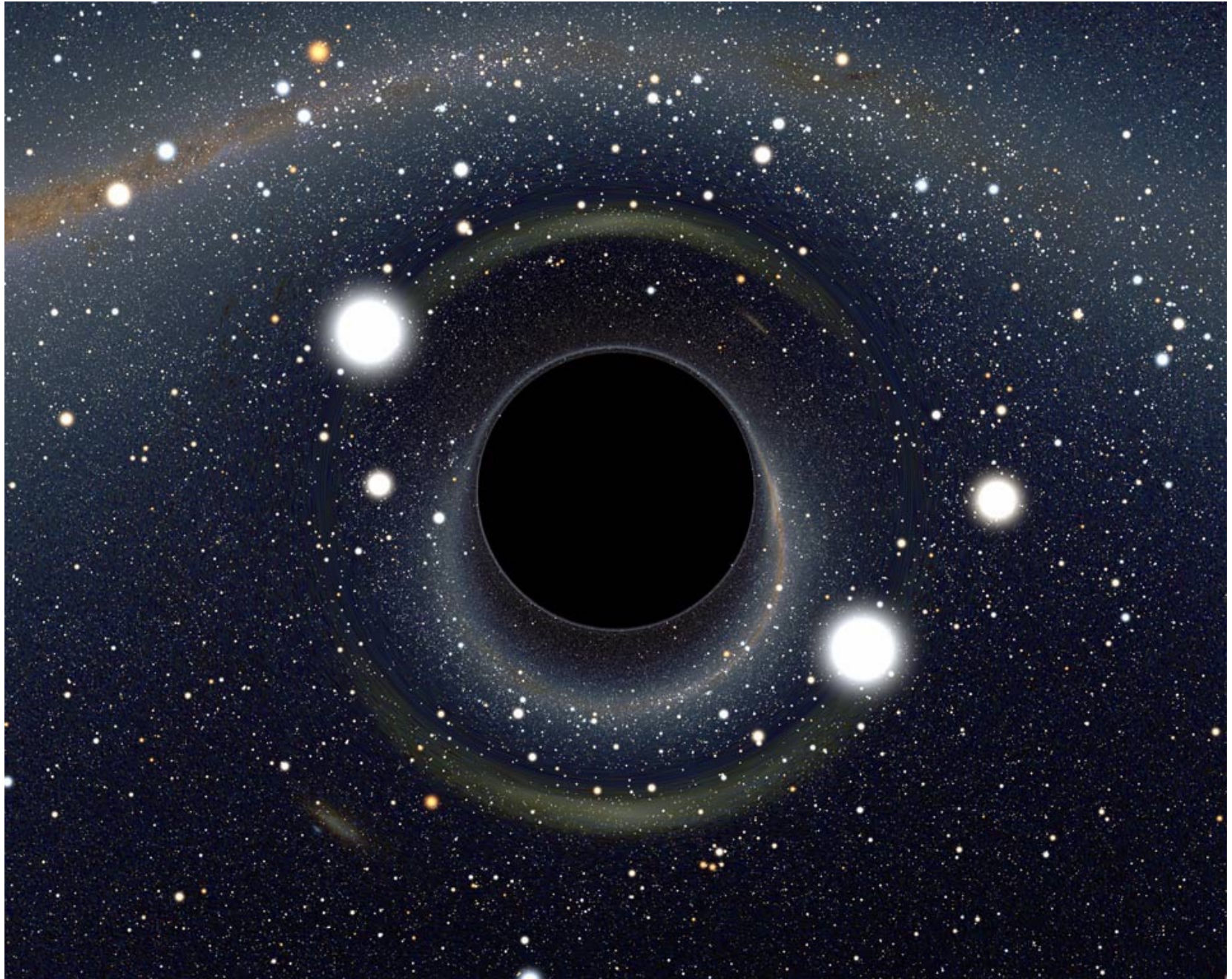


Η μελανή οπή στην κλασική ΓΘΣ

Καμιά πληροφορία δεν μπορεί να εξέλθει από την ακτίνα Schwarzschild, κι έτσι αυτή αποτελεί έναν ορίζοντα γεγονότων.

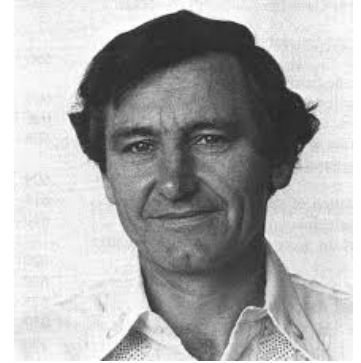


Η μελανή οπή ως βαρυτικός φακός

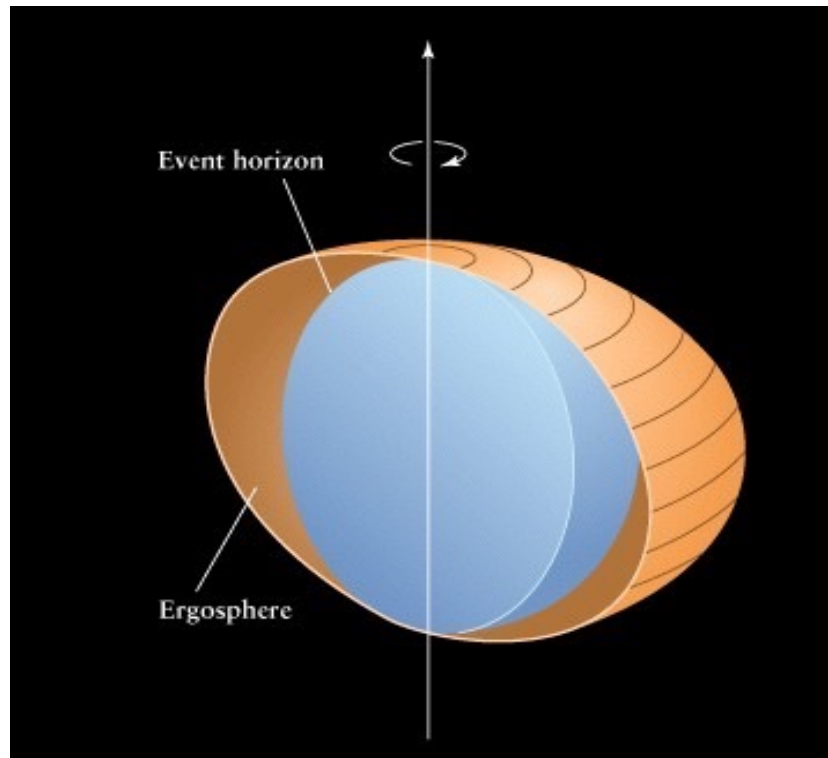


Περιστρεφόμενη μελανή οπή

1963: Kerr: Βρήκε αναλυτική λύση που περιγράφει περιστρεφόμενες μελανές οπές.



Πιο περίπλοκη δομή: ύπαρξη **εργόσφαιρας** και **διαφορική περιστροφή** αδρανειακών παρατηρητών.



Μελανή οπή στο κέντρο του Γαλαξία (Sgr A*)

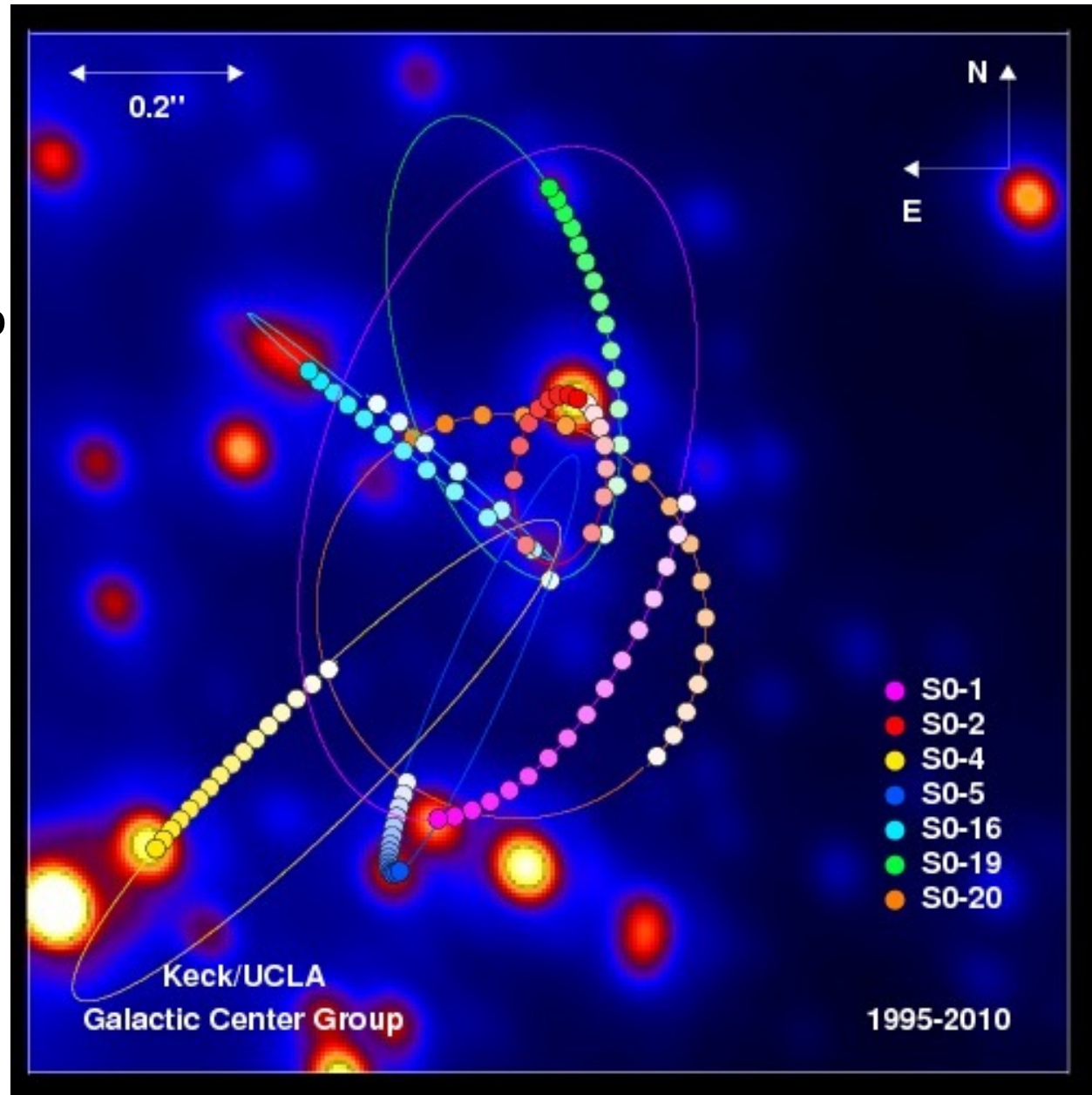
Απόσταση από εμάς:

26000 έτη φωτός

Κίνηση άστρων γύρω από τον Sgr A*

Μάζα μελανής οπής:

4 εκατομμύρια ηλιακές μάζες

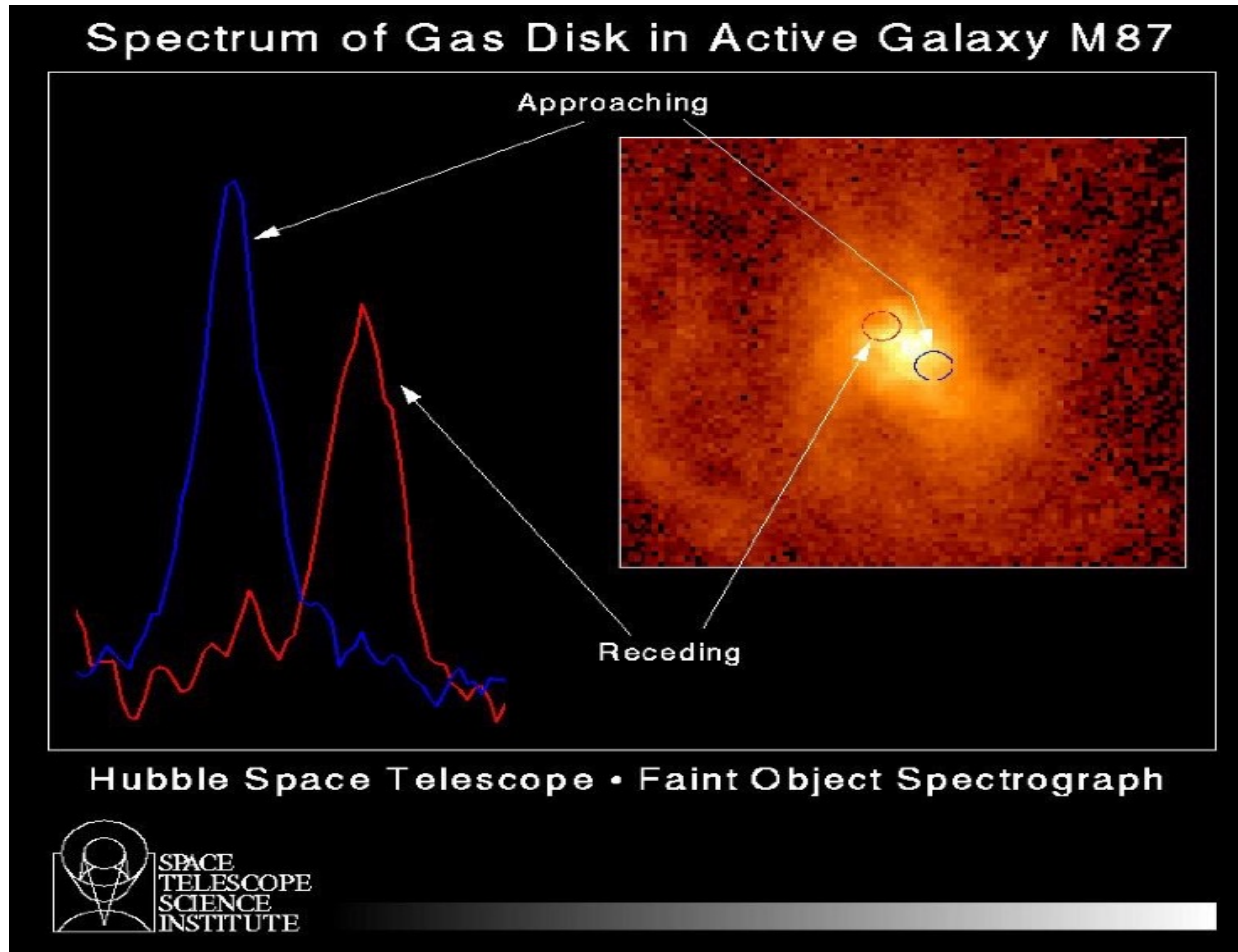


Μέτρηση Ταχυτήτων Κοντά στη Μελανή Οπή M87

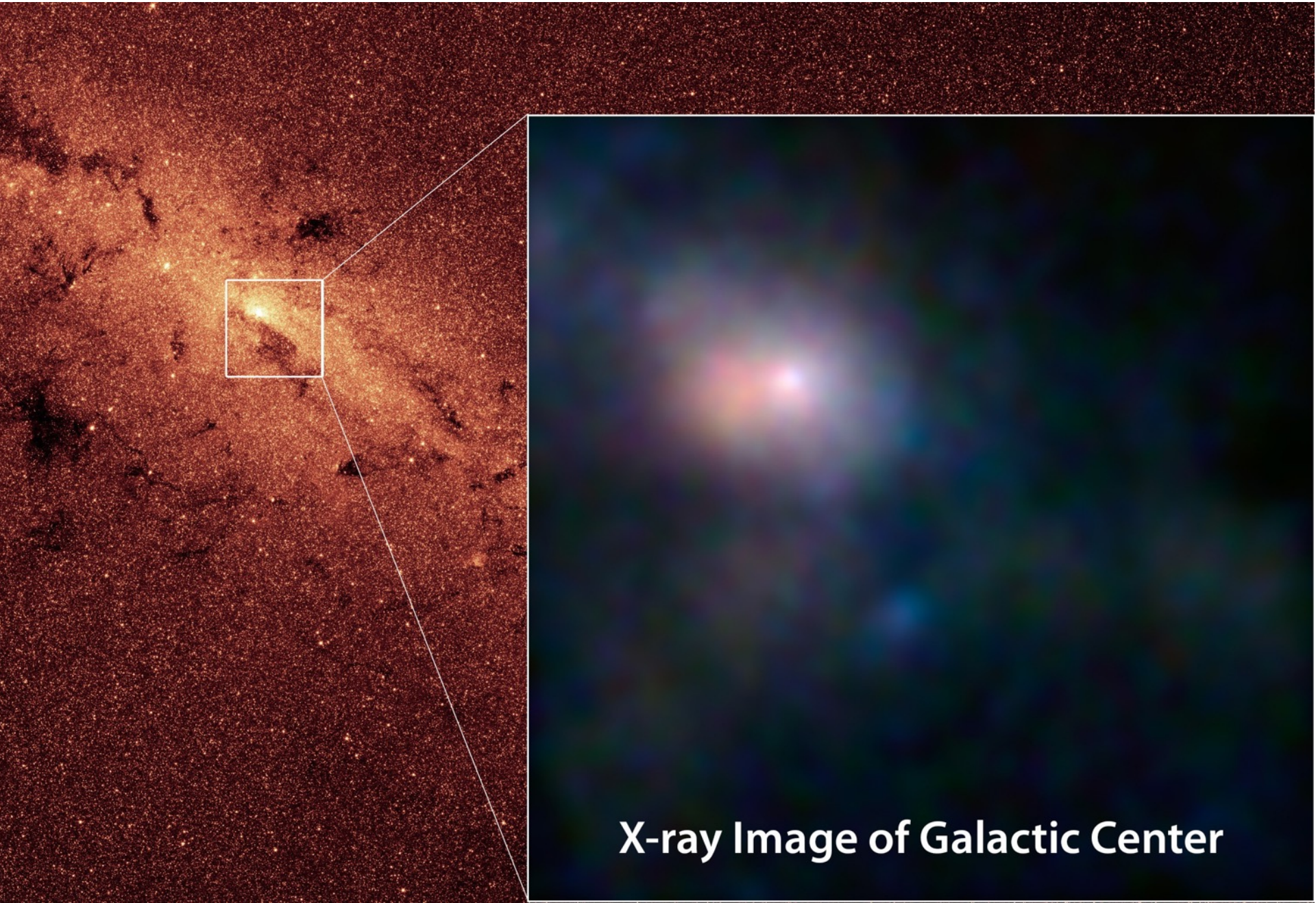
Απόσταση: 52 εκ. έτη φωτός (2000 φορές πιο μακριά από τον Sgr A*)

Μετάθεση Doppler γνωστών φασματικών γραμμών: ταχύτητες ~550 km/s.

Μάζα: 6.5 δισεκατομμύρια ηλιακές μάζες.

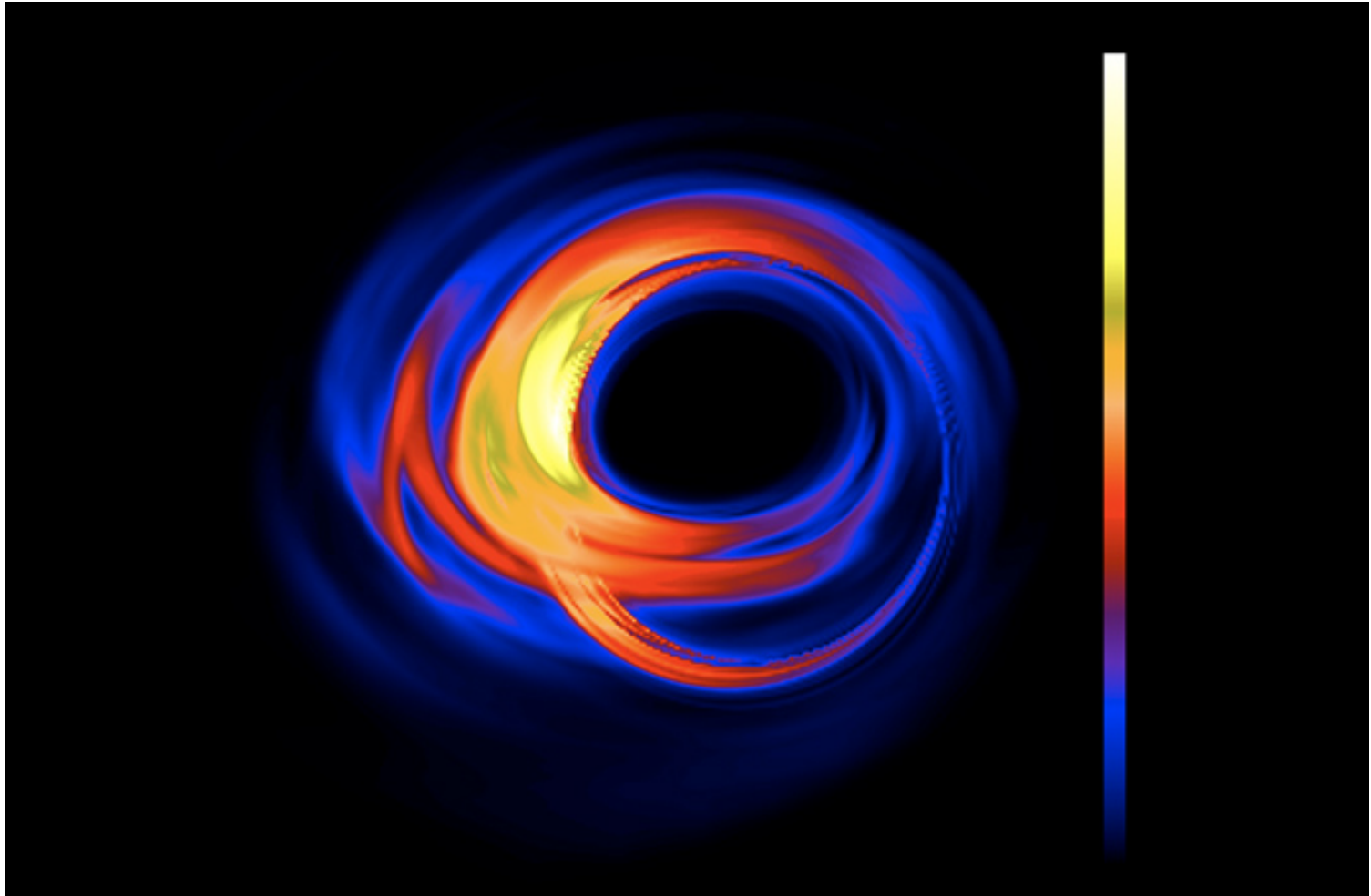


Μελανή οπή στο κέντρο του Γαλαξία (Sgr A*)

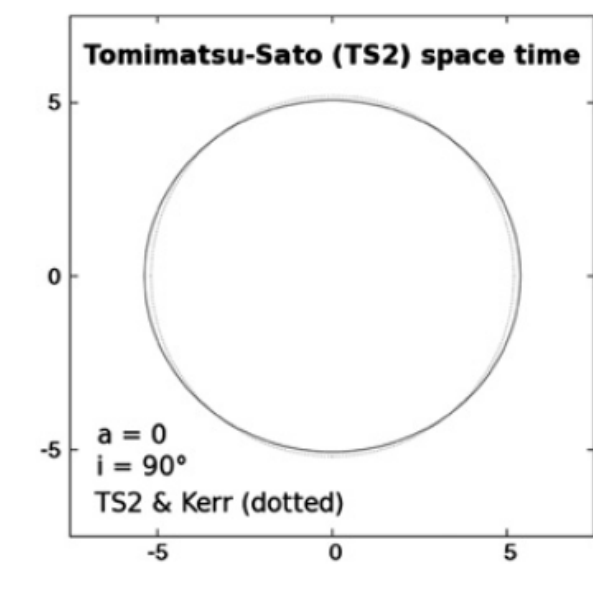
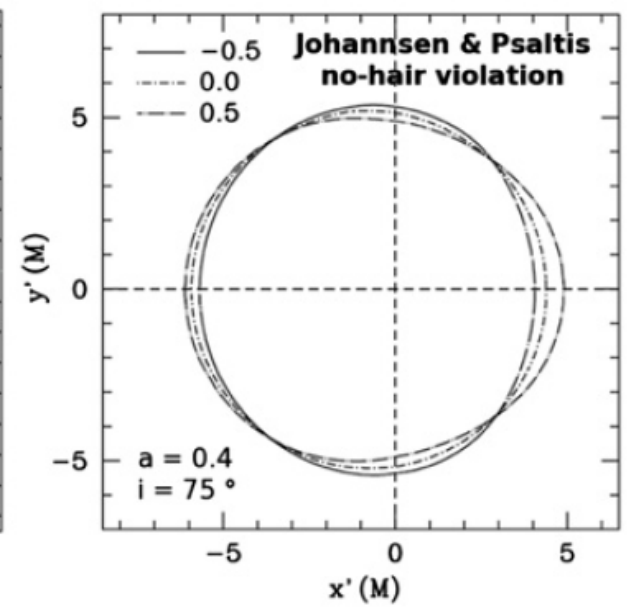
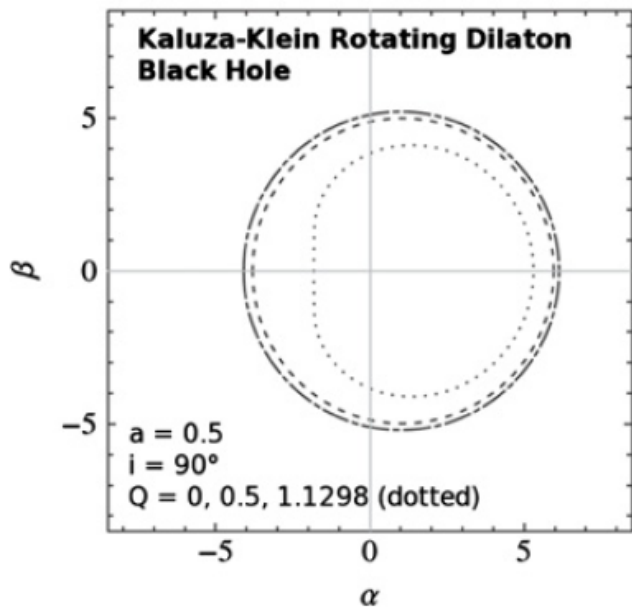
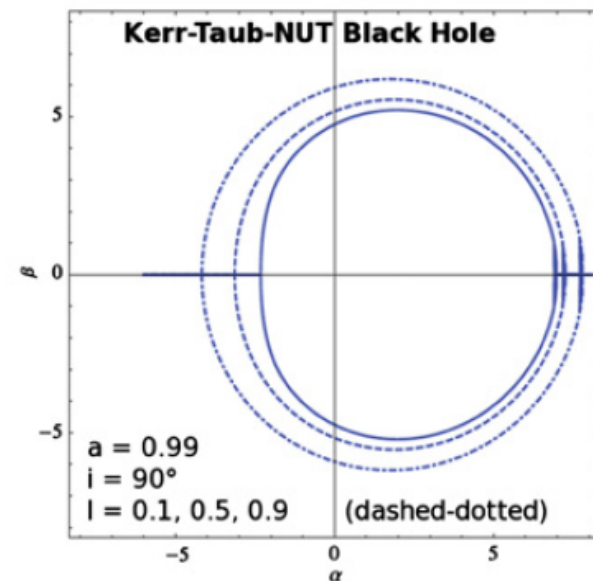
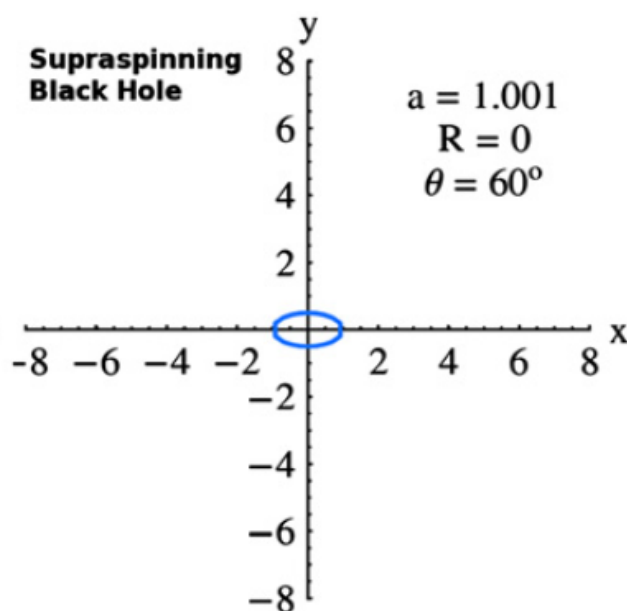
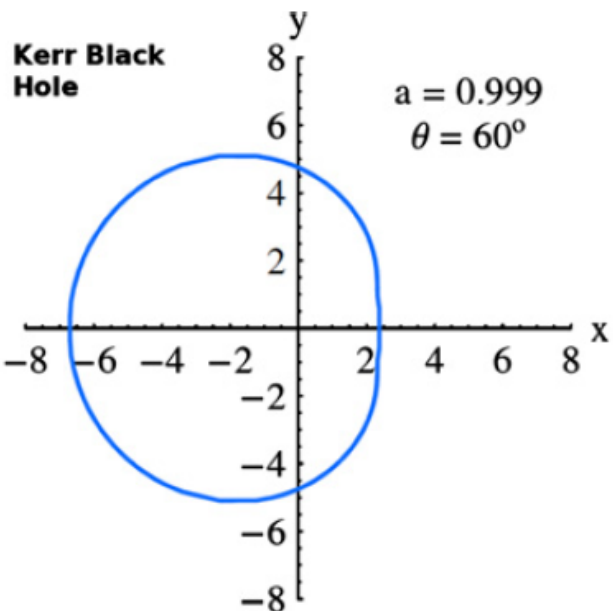


X-ray Image of Galactic Center

Η σκιά της μελανής οπής



Η σκιά της μ. ο. σύμφωνα με διάφορες θεωρίες



Event Horizon Telescope (EHT)

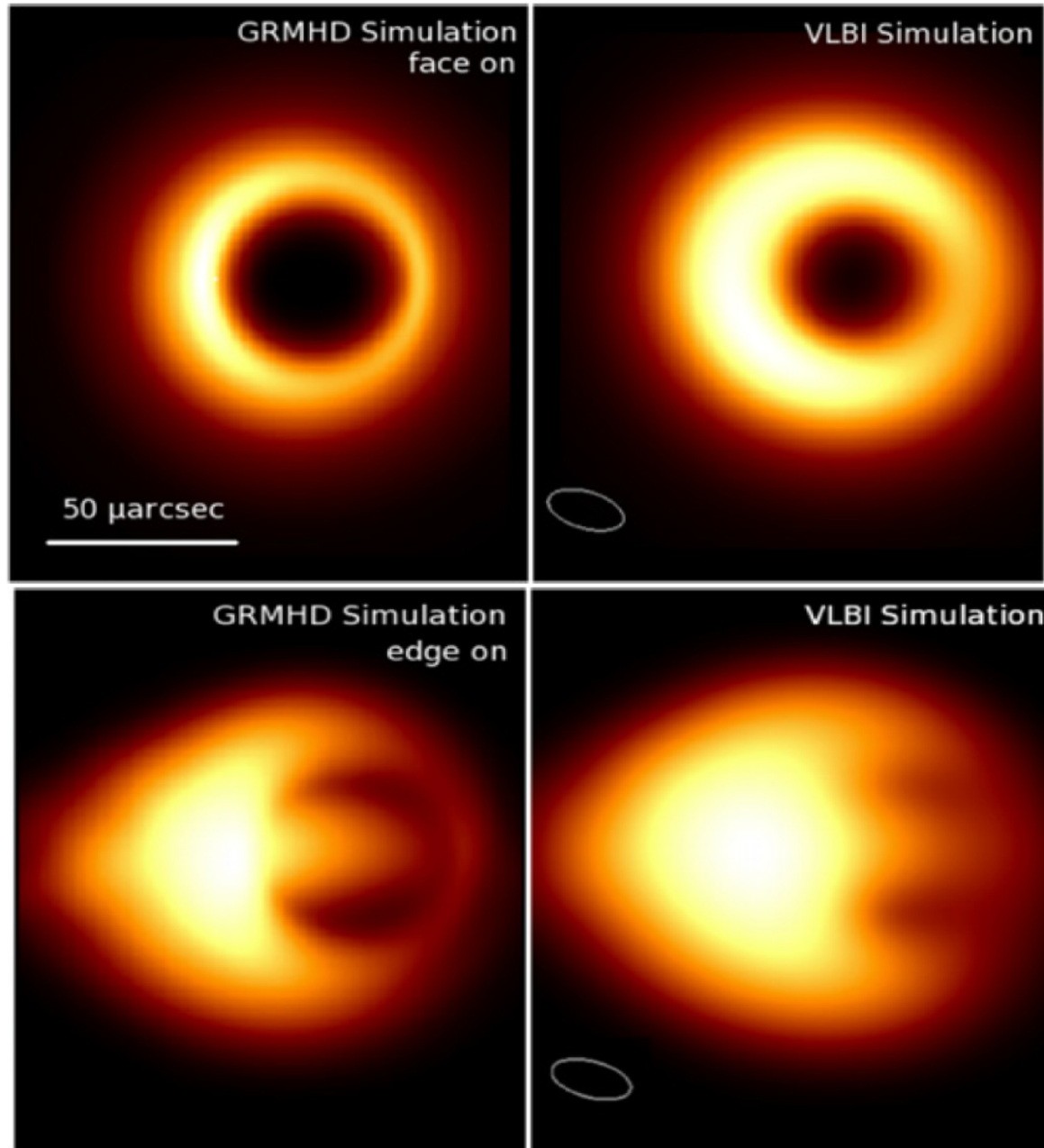
Ένας αριθμός ραδιοτηλεσκοπίων συνδυάζεται συμβολομετρικά, για να πετύχουμε ακρίβεια ίση με ένα τηλεσκόπιο με διάμετρο όση η Γη.



Ραδιοτηλεσκόπιο ALMA στη Χιλή



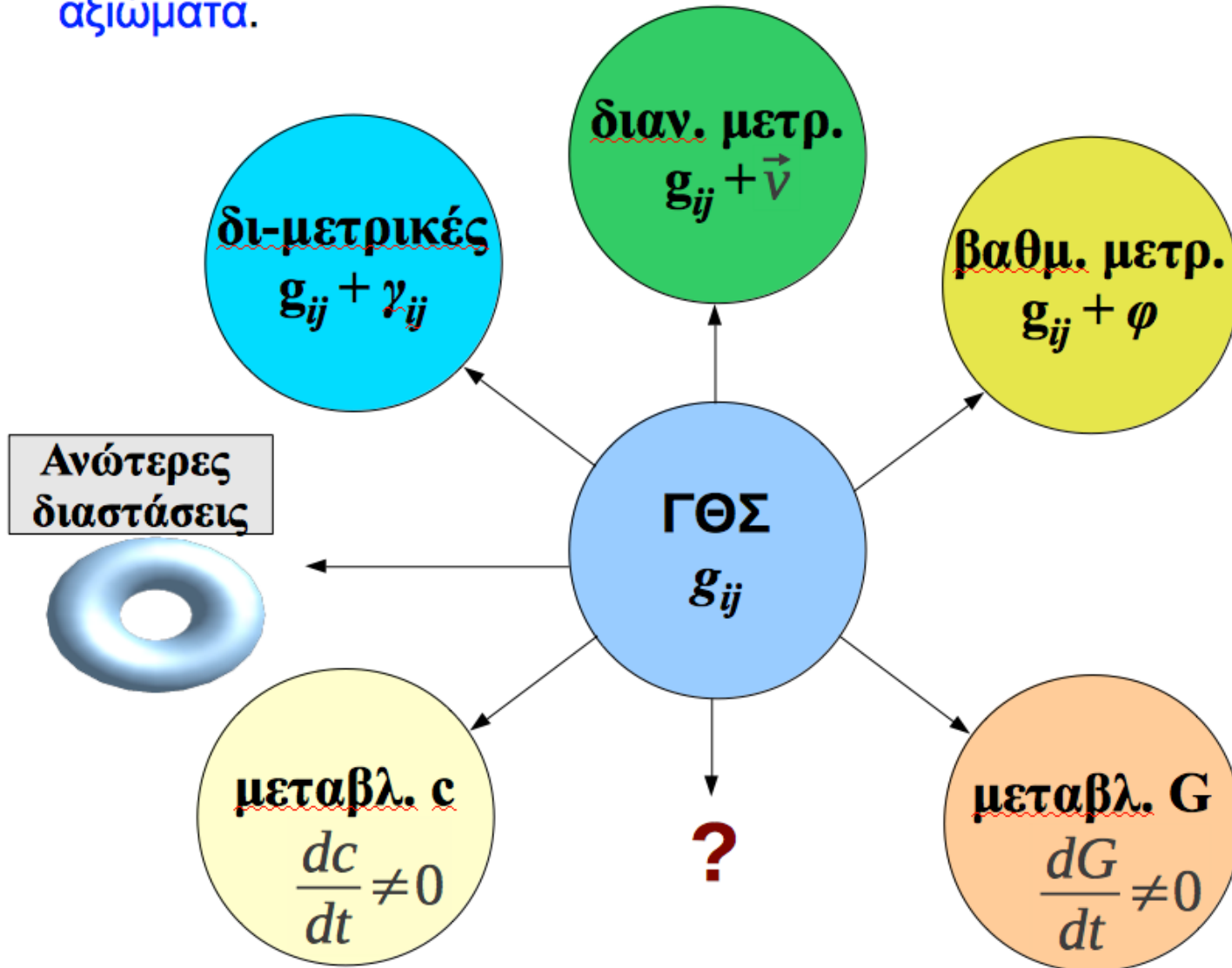
Αναμενόμενες παρατηρήσεις



3. Επεκτάσεις της ΓΘΣ – Πειραματικοί έλεγχοι

Επεκτάσεις της ΓΘΣ

Σήμερα υπάρχουν **επεκτάσεις** της ΓΘΣ, που βασίζονται σε **διαφορετικά αξιώματα**.



Επεκτάσεις της ΓΘΣ

Οι 4-διάστατες επεκτάσεις έχουν ως **βάση τη ΓΘΣ** και αποκλίνουν από αυτή κατά *10 διαφορετικές παραμέτρους*.



Οι δύο κύριες παράμετροι απόκλισης από τη ΓΘΣ είναι οι $\bar{\gamma}$, $\bar{\beta}$.

Εάν βρεθεί πειραματικά ότι έχουν μη-μηδενικές τιμές, τότε η ΓΘΣ θα αντικατασταθεί από μια νέα, πιο ακριβή θεωρία.

Επεκτάσεις της ΓΘΣ

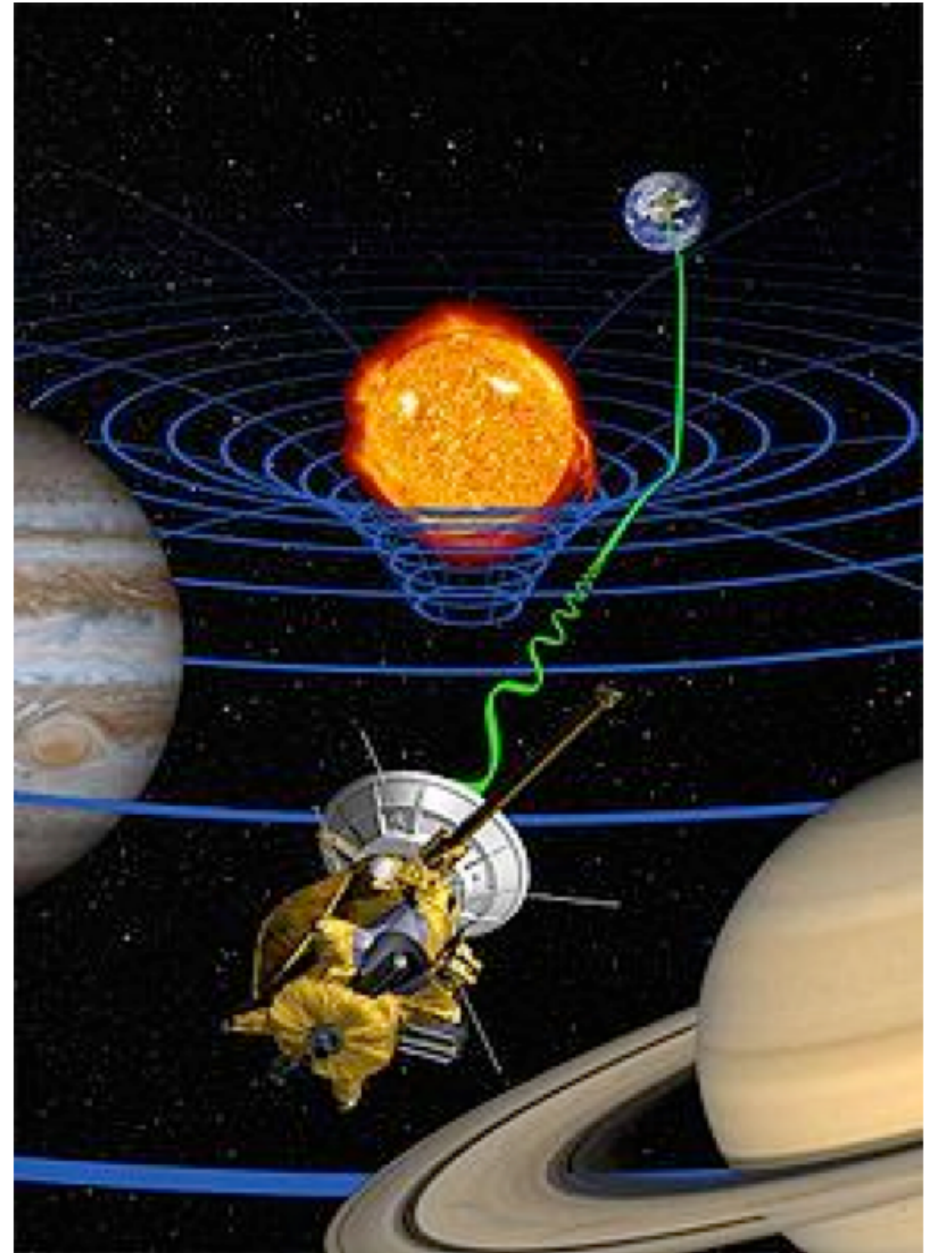
	γ	β	ξ	α_1	α_2	α_3	ζ_1	ζ_2	ζ_3	ζ_4
Einstein (1916) GR	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Scalar-Tensor theories										
Bergmann (1968), Wagoner (1970)	$\frac{1+\omega}{2+\omega}$	β	0	0	0	0	0	0	0	0
Nordtvedt (1970), Bekenstein (1977)	$\frac{1+\omega}{2+\omega}$	β	0	0	0	0	0	0	0	0
Brans-Dicke (1961)	$\frac{1+\omega}{2+\omega}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Vector-Tensor theories										
Hellings-Nordtvedt (1973)	γ	β	0	α_1	α_2	0	0	0	0	0
Will-Nordtvedt (1972)	1	1	0	0	α_2	0	0	0	0	0
Bimetric theories										
Rosen (1975)	1	1	0	0	$c_0 / c_1 - 1$	0	0	0	0	0
Rastall (1979)	1	1	0	0	α_2	0	0	0	0	0
Lightman-Lee (1973)	γ	β	0	α_1	α_2	0	0	0	0	0
Stratified theories										
Lee-Lightman-Ni (1974)	ac_0 / c_1	β	ξ	α_1	α_2	0	0	0	0	0
Ni (1973)	ac_0 / c_1	bc_0	0	α_1	α_2	0	0	0	0	0
Scalar Field theories										
Einstein (1912) {Not GR}	0	0		-4	0	-2	0	-1	0	0†
Whitrow-Morduch (1965)	0	-1		-4	0	0	0	-3	0	0†
Rosen (1971)	λ	$\frac{3}{4} + \frac{\lambda}{4}$		$-4 - 4\lambda$	0	-4	0	-1	0	0
Papetrou (1954a, 1954b)	1	1		-8	-4	0	0	2	0	0
Ni (1972) (stratified)	1	1		-8	0	0	0	2	0	0
Yilmaz (1958, 1962)	1	1		-8	0	-4	0	-2	0	-1†
Page-Tupper (1968)	γ	β		$-4 - 4\gamma$	0	$-2 - 2\gamma$	0	ζ_2	0	ζ_4
Nordström (1912)	-1	$\frac{1}{2}$		0	0	0	0	0	0	0†
Nordström (1913), Einstein-Fokker (1914)	-1	$\frac{1}{2}$		0	0	0	0	0	0	0
Ni (1972) (flat)	-1	$1 - q$		0	0	0	0	ζ_2	0	0†
Whitrow-Morduch (1960)	-1	$1 - q$		0	0	0	0	q	0	0†
Littlewood (1953), Bergman(1956)	-1	$\frac{1}{2}$		0	0	0	0	-1	0	0†

Πειραματικοί έλεγχοι

Τα σήματα ραντάρ που έστειλε το διαστημόπλοιο Cassini κατά τη διάρκεια μιας έκλειψης της Γης από τον Ήλιο, έφτασαν με καθυστέρηση, λόγω της καμπύλωσης της τροχιάς των ραδιοκυμάτων.

Η παράμετρος $\bar{\gamma}$ μετρήθηκε ως

$$\bar{\gamma} \sim 10^{-5}$$



Πειραματικοί έλεγχοι

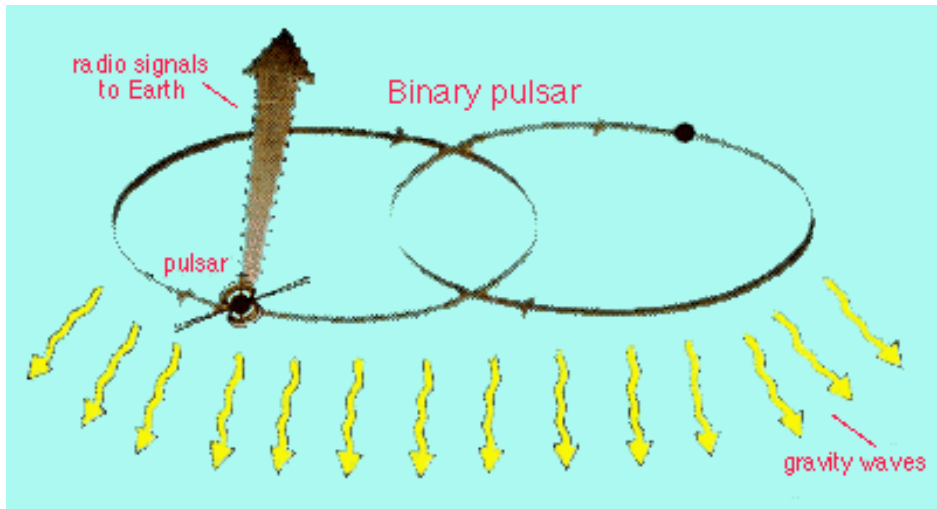
Parameter Bound		Effects	Experiments
$\gamma - 1$	2.3×10^{-5}	Time delay, Light deflection	Cassini tracking
$\beta - 1$	1.1×10^{-4}	Nordtvedt effect, Perihelion shift	Nordtvedt effect
ζ	0.001	Earth tides	Gravimeter data
α_1	10^{-4}	Orbit polarization	Lunar laser ranging
α_2	4×10^{-7}	Spin precession	Sun axis' alignment with ecliptic
α_3	2.2×10^{-20}	Self-acceleration	Pulsar spin-down statistics
ζ_1	0.02	-	Combined PPN bounds
ζ_2	4×10^{-5}	Binary pulsar acceleration	PSR 1913+16
ζ_3	10^{-8}	Newton's 3rd law	Lunar acceleration
ζ_4	0.006	-	Kreuzer experiment

4. Βαρυτικά Κύματα

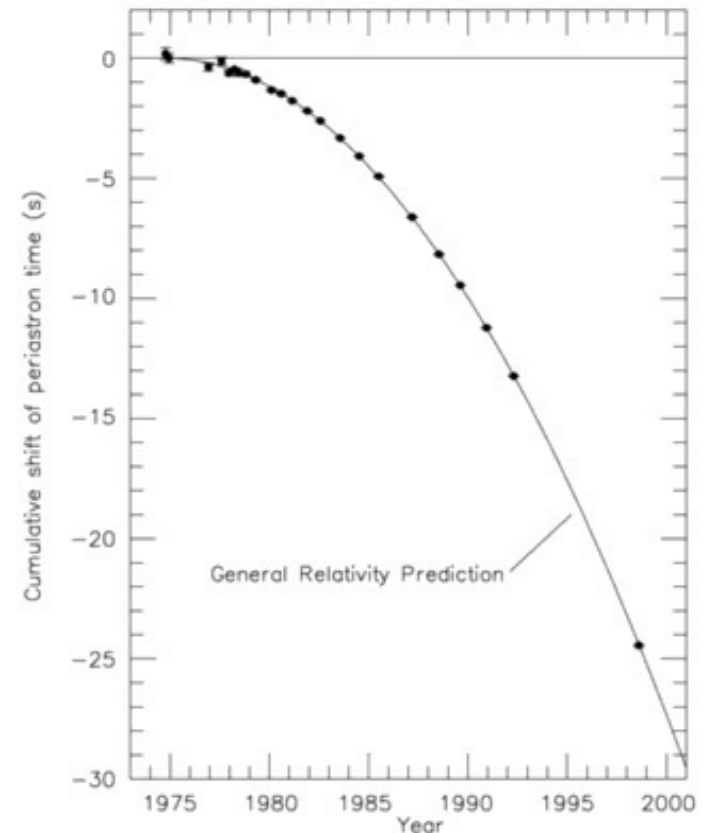
Βαρυτικά κύματα

Τα βαρυτικά κύματα παράγονται κατά την **κίνηση μαζών** και **μεταδίδουν τη βαρυτική αλληλεπίδραση**.

Ιδιαίτερα έντονα είναι στην περίπτωση **διπλών συστημάτων με αστέρες νετρονίων**.

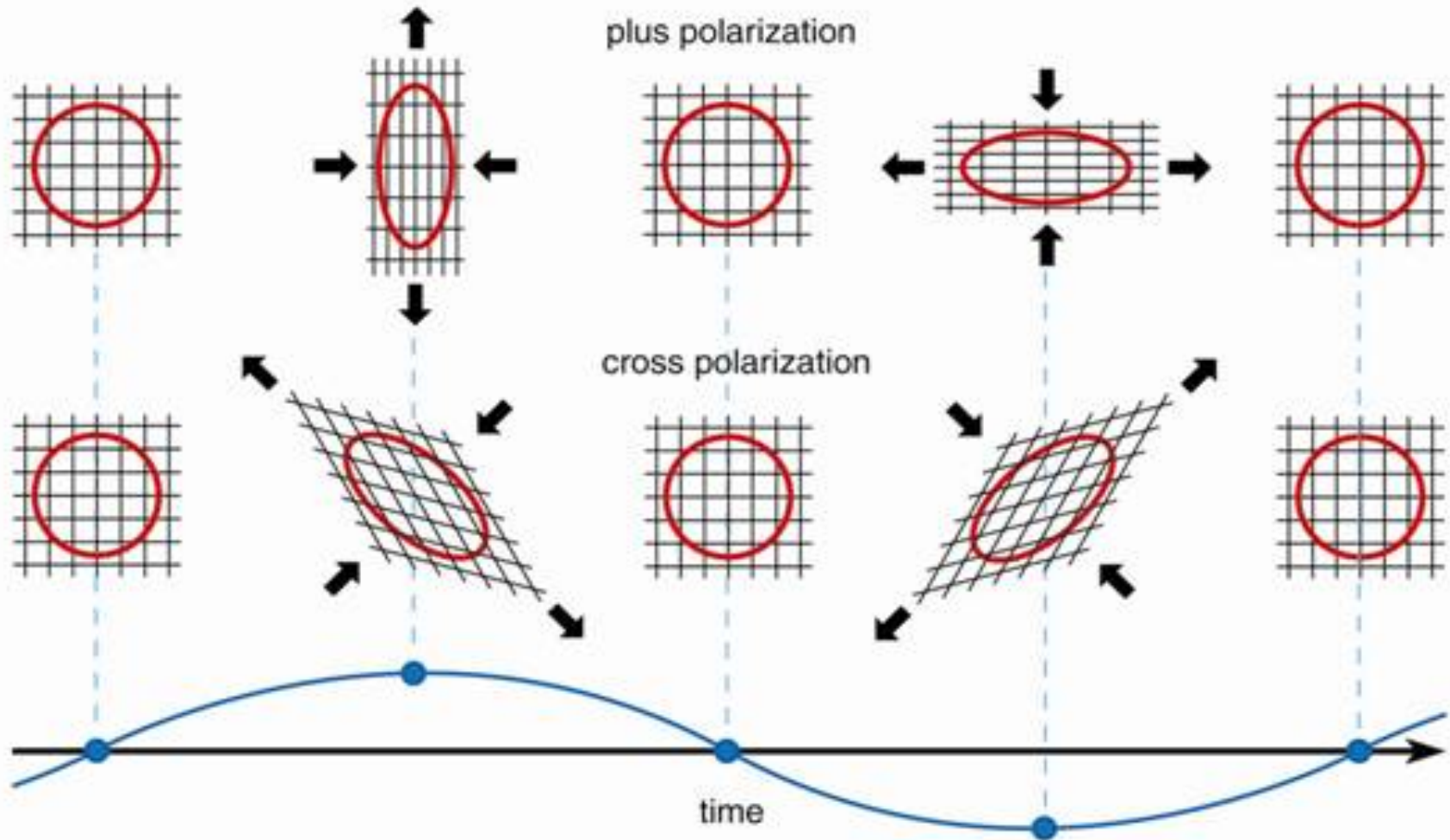


Βραβείο Νόμπελ
Φυσικής 1993
Hulse & Taylor



Πόλωση των Βαρυτικών Κυμάτων

Τα βαρυτικά κύματα είναι *εγκάρσια* και έχουν δύο ειδών *πολώσεις*:



Πηγές βαρυτικών κυμάτων

Οι σημαντικότερες πηγές βαρυτικών κυμάτων με πιθανότητα μελλοντικής ανίχνευσης είναι:

α) Διπλά συστήματα αστέρων νετρονίων και μελανών οπών

β) Αστρική κατάρρευση

γ) Αστάθειες περιστρεφόμενων αστέρων νετρονίων

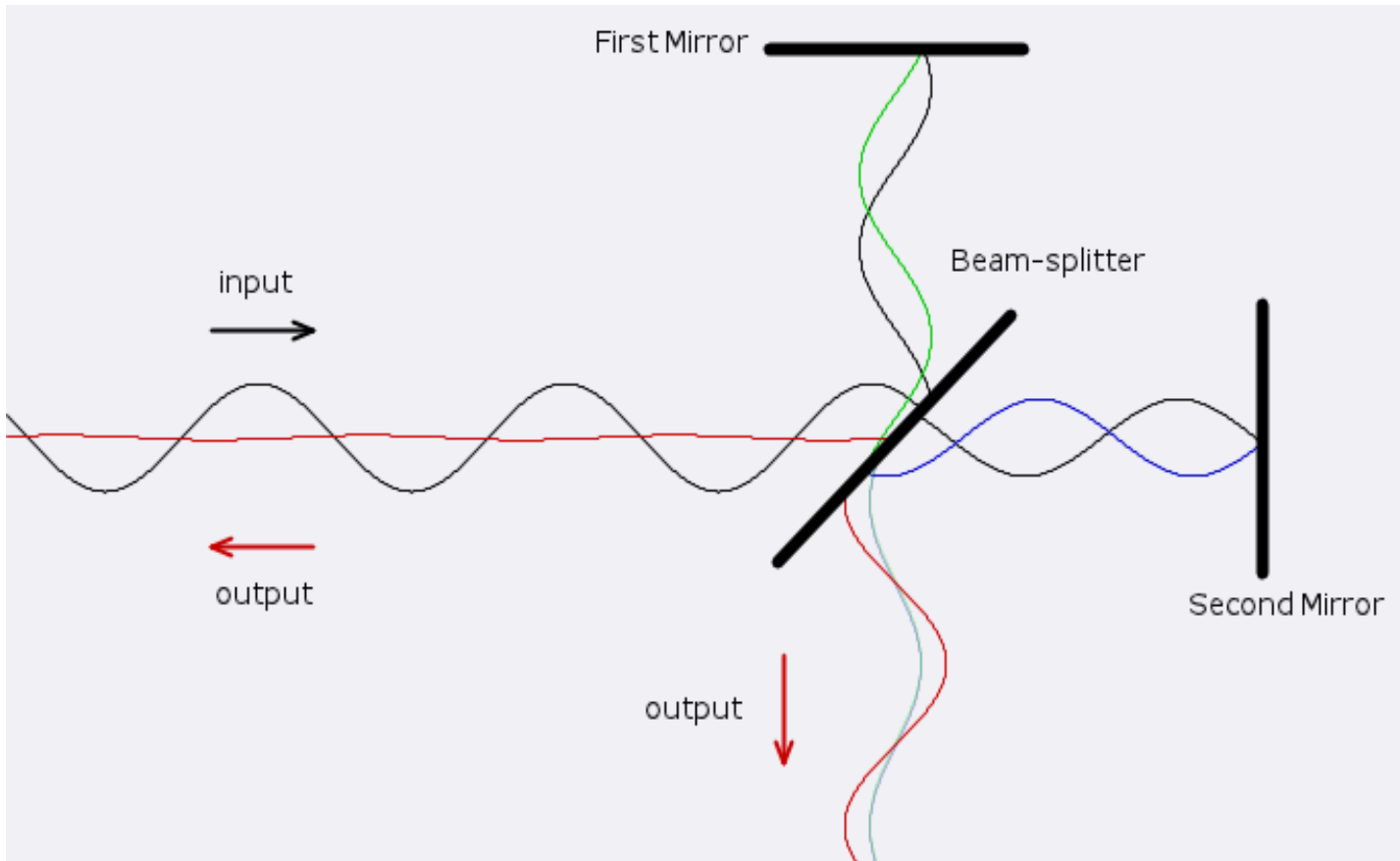
δ) Περιστρεφόμενοι αστέρες νετρονίων με ασύμμετρο σχήμα

ε) Κοσμολογικές πηγές

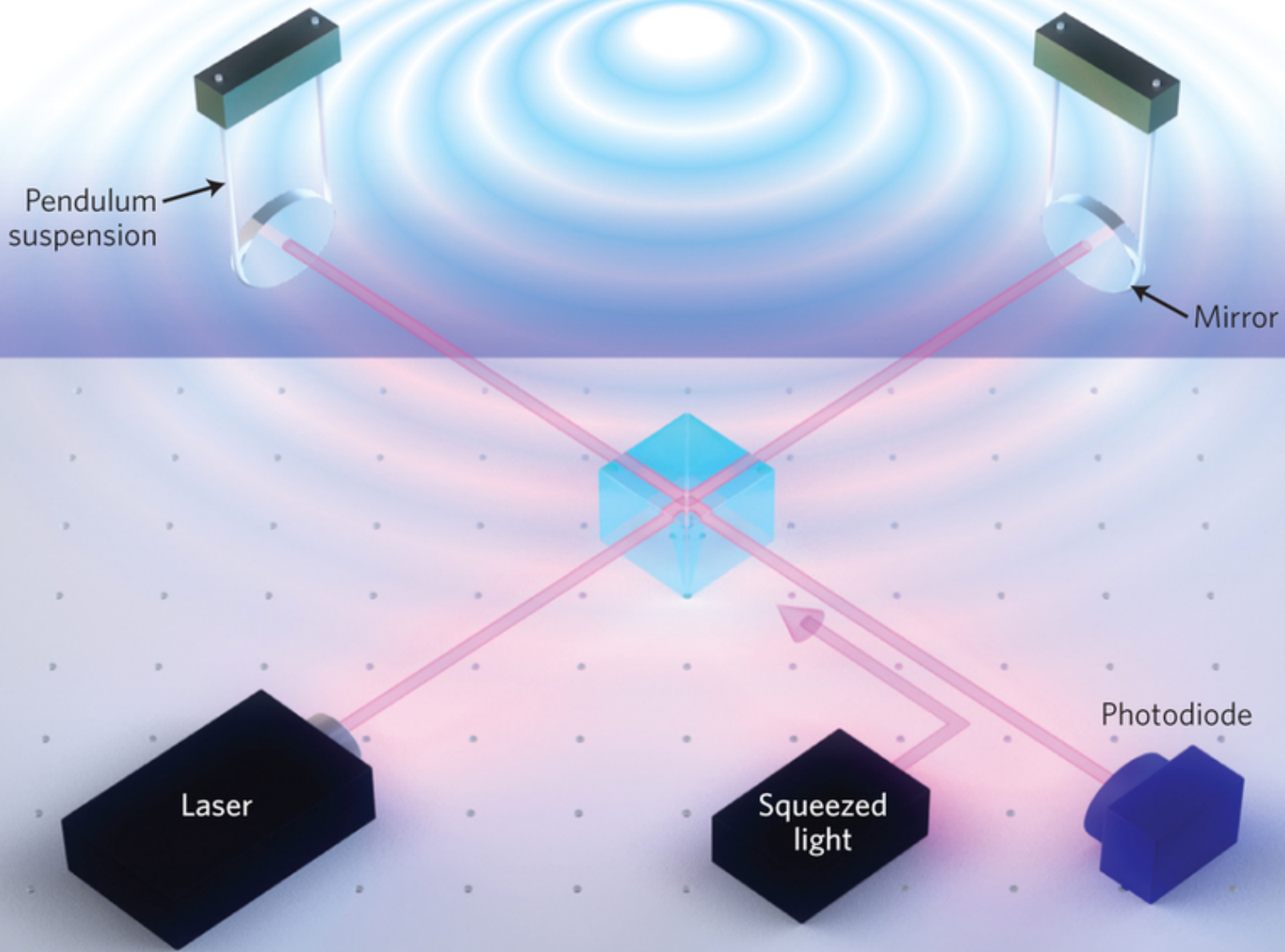
Συμβολόμετρο Ακτίνων Laser

Ουσιαστικά πρόκειται για μια μεγάλης κλίμακας **διάταξη τύπου Michelson-Morley**. Επειδή το μήκος κύματος των βαρυτικών κυμάτων είναι μεγαλύτερο από το μήκος των ακτίνων laser, χρησιμοποιείται **πολλαπλή ανάκλαση** (optical cavity) 100 με 1000 φορές.

Η ισχύς της πηγής ακτίνων laser είναι της τάξης των **40 kW**.



Gravitational waves



Πηγές Πειραματικού Θορύβου

Η ευαισθησία του ανιχνευτή περιορίζεται από διάφορες πηγές θορύβου:

Στις χαμηλές συχνότητες:

Σεισμικές δονήσεις

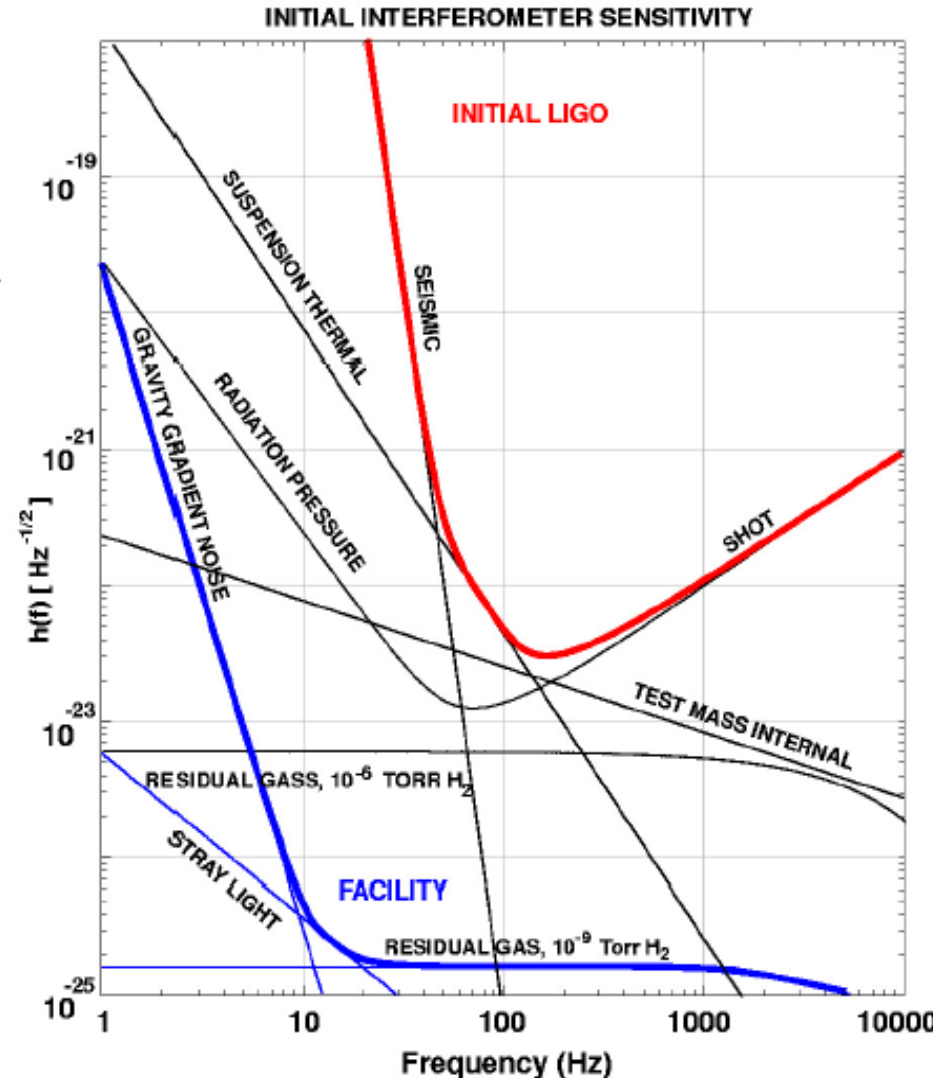
Τοπικές μεταβολές της βαρύτητας (ένα πουλί που πετά σε απόσταση 50m προκαλεί διαταραχές της τάξης 10^{-16} στη συχνότητα 1Hz !)

Στις μεσαίες συχνότητες:

Θερμικός θόρυβος

Στις υψηλές συχνότητες:

Κβαντικές διαταραχές της ακτίνας laser



Παγκόσμιο Δίκτυο Συμβολόμετρων Ακτίνων Laser

Μελλοντικά, όλοι οι συμβολομετρικοί ανιχνευτές θα λειτουργούν ως ένα *ενιαίο πείραμα*, το οποίο θα επιτρέπει τον *εντοπισμό θέσης* των διαφόρων πηγών.



4. Τεχνολογικές Εφαρμογές

Η Σχετικότητα στο GPS

Τροχιά δορυφόρων: 27.000 km

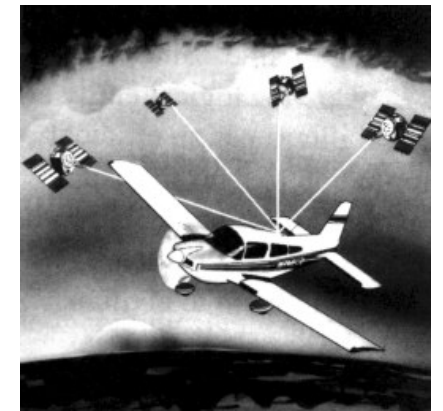
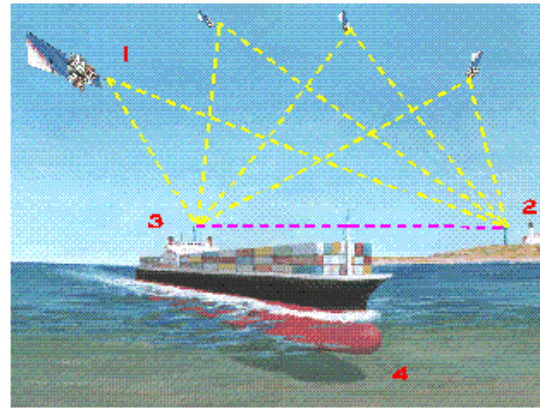
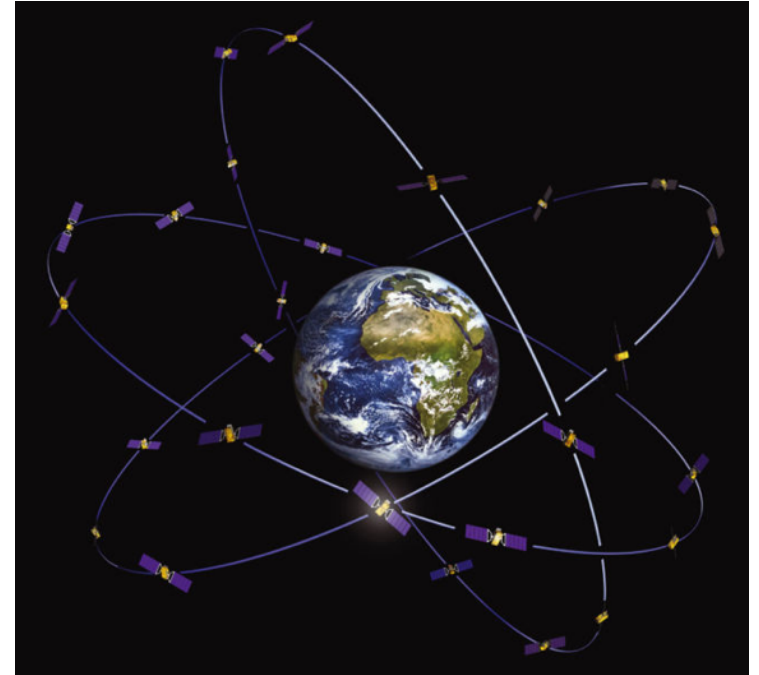
Ταχύτητα: 14.000 km/h

- 7 μικροδευτερόλεπτα/ημέρα
λόγω **Ειδικής Σχετικότητας**

+ 45 μικροδευτερόλεπτα/ημέρα
λόγω **Γενικής Σχετικότητας**

Σφάλμα χωρίς τη σχετικότητα:

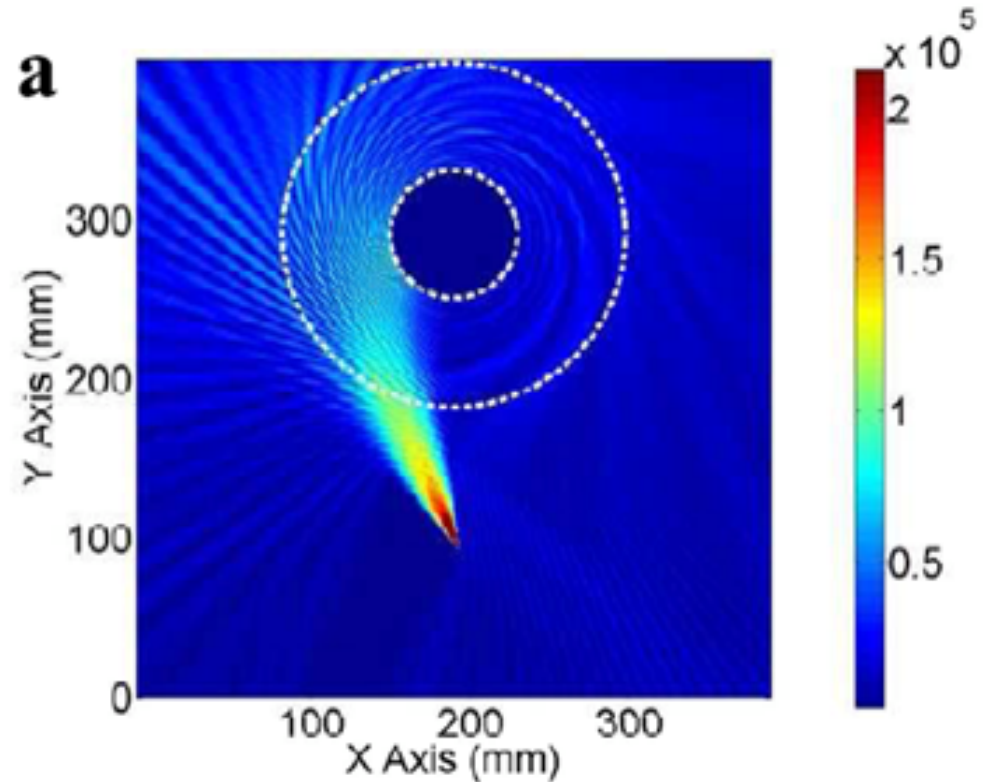
10 km την ημέρα!



Οπτικές μελανές οπές

Με χρήση νέων υλικών (μετα-υλικά) το φως μπορεί να παγιδευτεί με εντελώς ανάλογο τρόπο όπως στις μελανές οπές.

Η μαθηματική δομή της $\Gamma\Theta\Sigma$ χρησιμοποιείται για τη μαθηματική περιγραφή του φαινομένου.



“General Relativity and Electrical Engineering”

New Journal of Physics, 2006

ΤΕΛΟΣ

<http://www.astro.auth.gr/~niksterg>