

# Υπάρχουν οι Μελανές Οπές;

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΤΕΡΓΙΟΥΛΑΣ

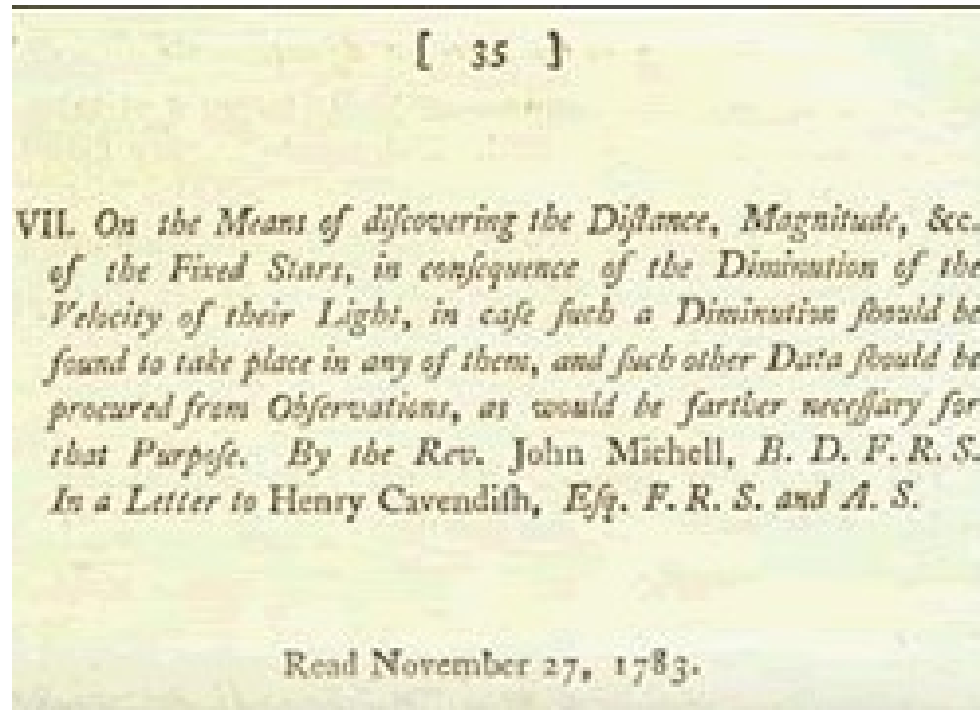
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ  
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



Θεσσαλονίκη, 10/2/2014

# Σκοτεινοί αστέρες

1783: Ο **John Michell** ανακαλύπτει την έννοια ενός **σκοτεινού αστέρα**, από τον οποίο το φως (υπό την επίδραση της βαρύτητας) δε μπορεί να Διαφύγει)



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

# Η αρχή της ισοδυναμίας

6<sup>ος</sup> 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»*

**Δηλαδή, η βαρύτητα προσδίδει επιτάχυνση στα σώματα ανεξάρτητη από τη μάζα τους!**

Αυτό μπορεί να συμβαίνει, μόνο εάν η μάζα αδράνειας  $m_a$  είναι ίση με τη βαρυτική μάζα  $m_b$ .

$$F = m_a a = G \frac{m_b M}{r^2}$$

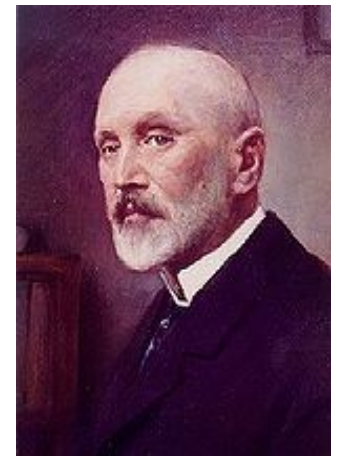
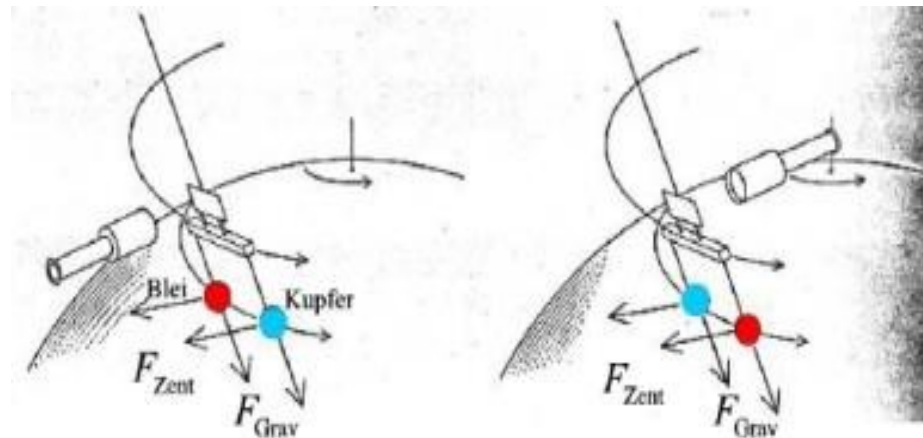
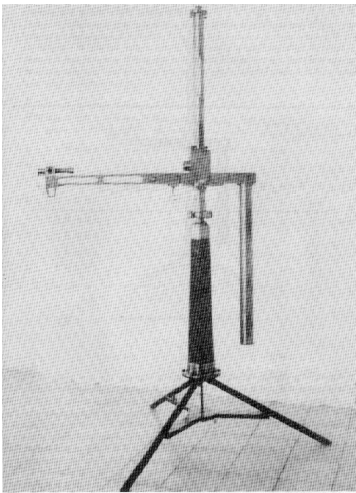
17<sup>ος</sup> αιώνας: Γαλιλαίος: πειραματική επαλήθευση

# Η αρχή της ισοδυναμίας

1880: Eötvös: πειραματική επαλήθευση

μάζα αδράνειας = βαρυτική μάζα

με σχετική ακρίβεια  $10^{-8}$ .



Σήμερα: LLR: σχετική ακρίβεια  $10^{-13}$

# Έλεγχος της Αρχής της Ισοδυναμίας

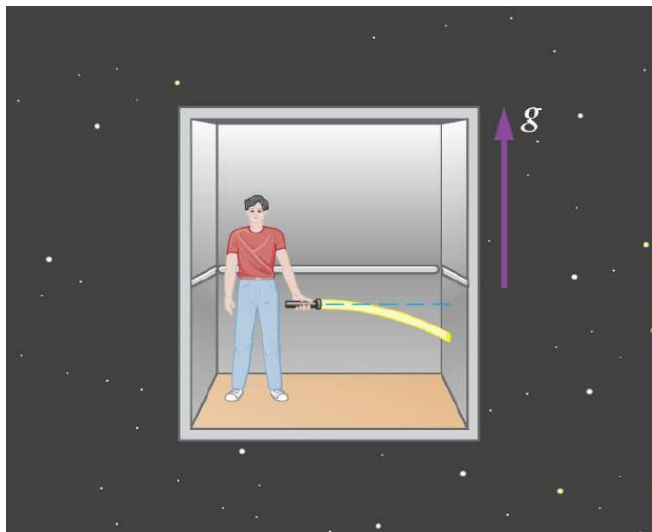
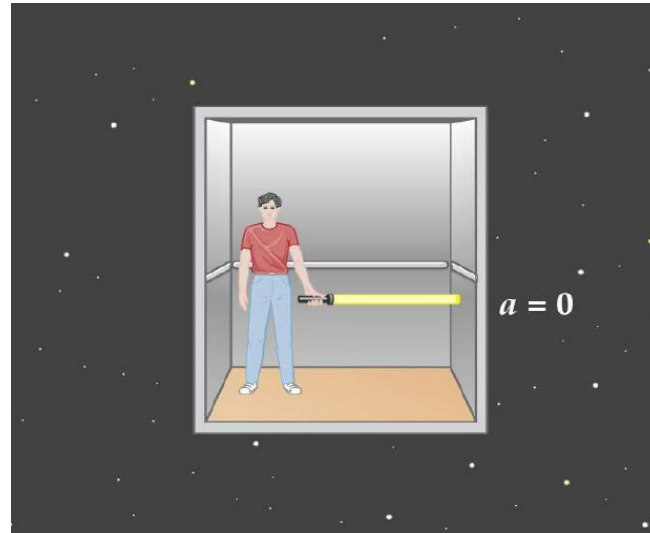
Με αποστασιόμετρα Laser, μετράται η απόσταση Γης-Σελήνης, με ακρίβεια χιλιοστών του μέτρου. Χρησιμοποιούνται ανακλαστήρες που τοποθετήθηκαν κατά τις αποστολές Apollo και Lunokhod.



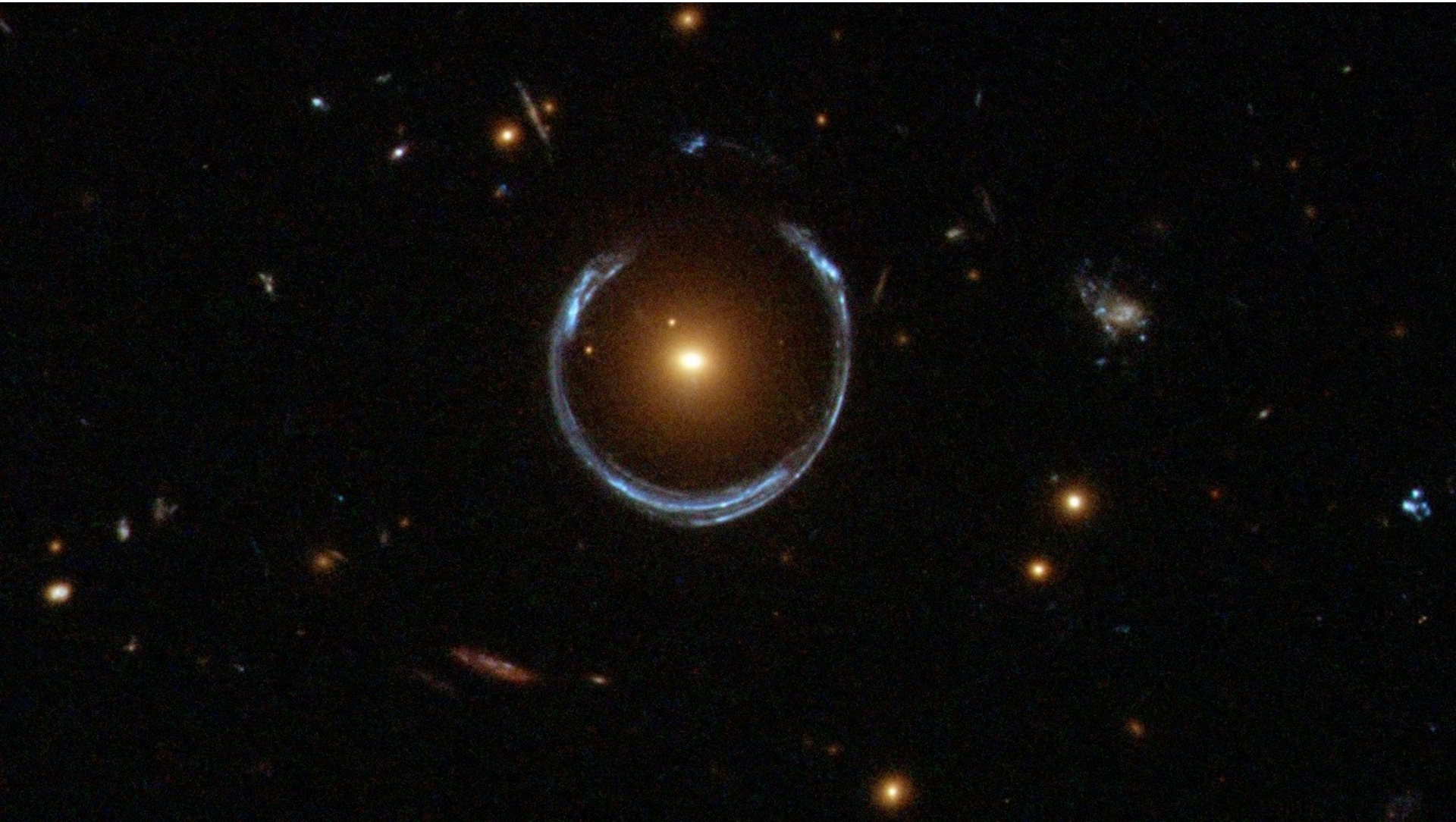
Στο μέλλον: μέτρηση της απόστασης Γης-Άρη με αποστασιόμετρα Laser!

# Η αρχή της ισοδυναμίας

1907: Ο Einstein αποδεικνύει με βάση την αρχή της ισοδυναμίας ότι η τροχιά των φωτονίων καμπυλώνεται από βαρυτικά πεδία.



# "Δαχτυλίδι του Einstein" LRG 3-757



# Ελάττωση της (κλασικής) ενέργειας φωτονίων

Η κλασική ενέργεια  $E = h\nu$  ενός φωτονίου ελαττώνεται, όταν αυτό εξέρχεται από ένα βαρυτικό πεδίο.

Ένα φωτόνιο που εκπέμπεται με ενέργεια  $E_0$  σε κάποια απόσταση  $r$  από μια πηγή βαρύτητας, θα φτάσει σε μεγάλη απόσταση με μικρότερη ενέργεια

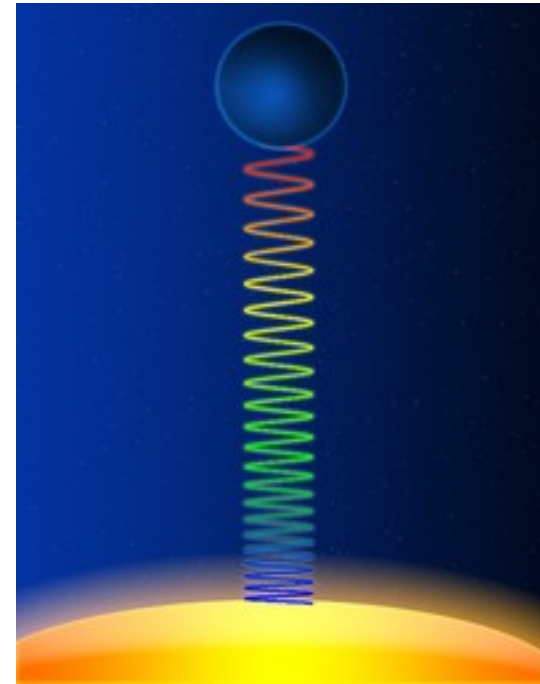
$$E = \left(1 - \frac{R_s}{r}\right)^{1/2} E_0$$

όπου  $R_s$  είναι η ακτίνα Schwarzschild.

Ένα οποιοδήποτε σώμα με μάζα  $M$ , αρκεί να συρρικνωθεί αρκετά, ώστε η ακτίνα του να γίνει ακτίνα Schwarzschild.

Ήλιος:  $R_s = 3\text{km}$

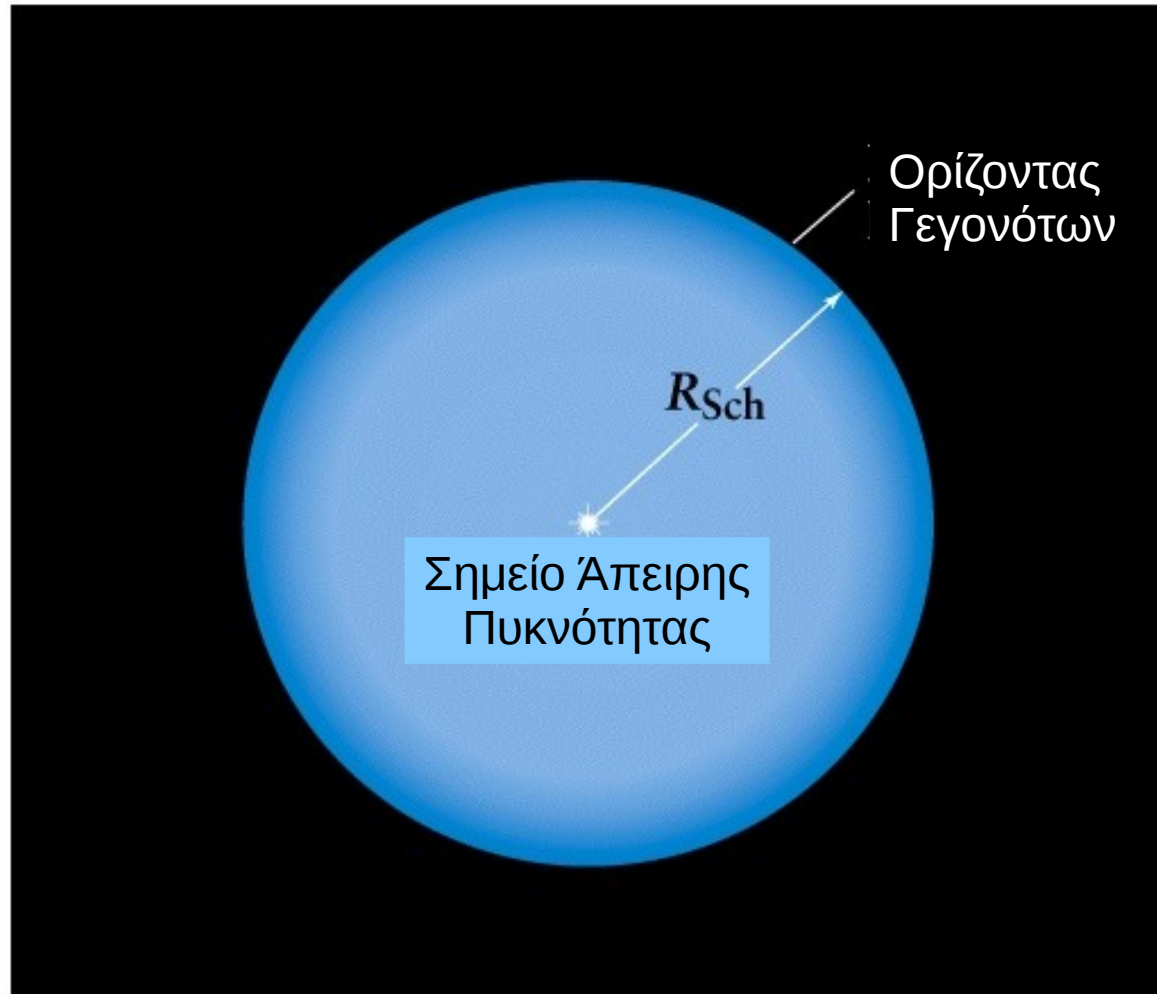
Γη:  $R_s = 9\text{mm}$





# Η μελανή οπή στην κλασική ΓΘΣ

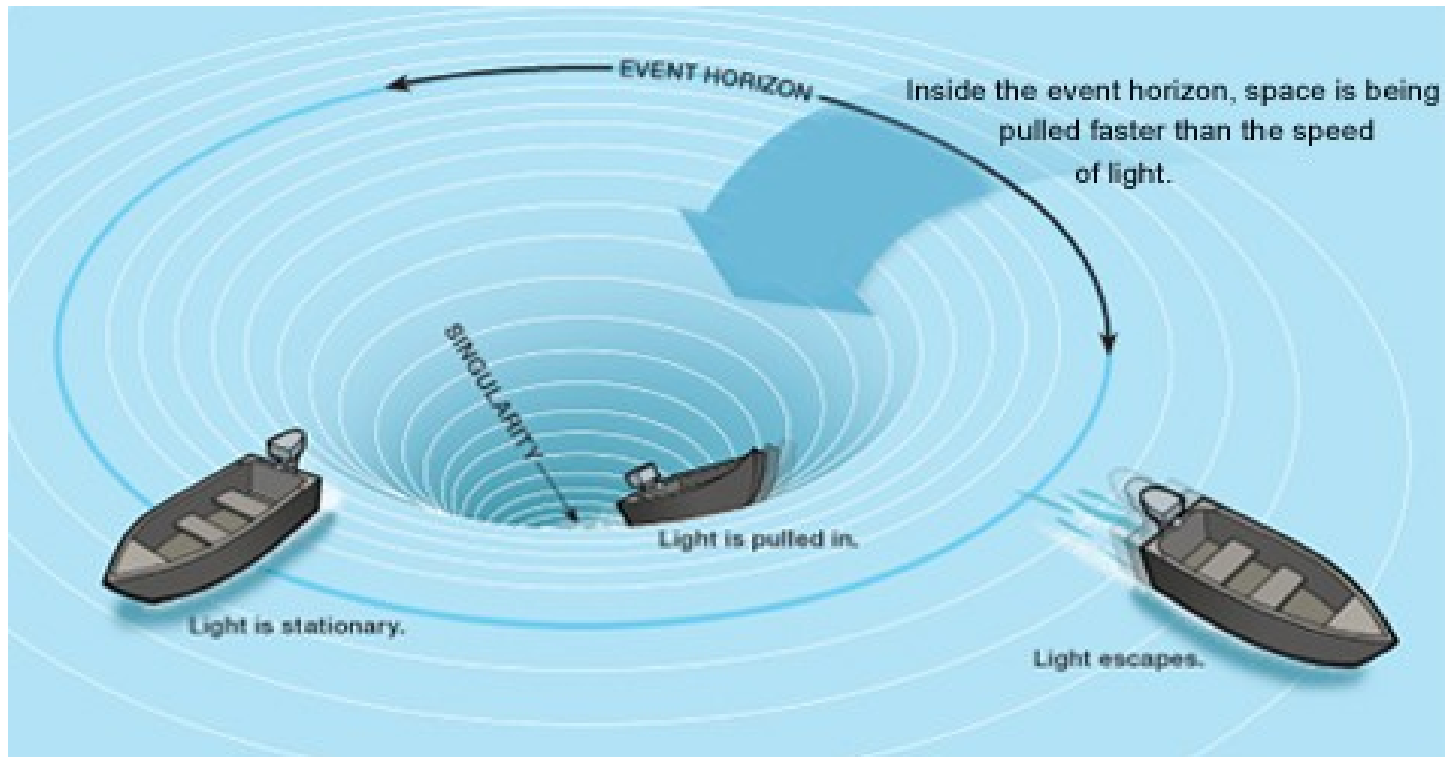
**Καμιά πληροφορία δεν μπορεί να εξέλθει** από την ακτίνα Schwarzschild, κι έτσι αυτή αποτελεί έναν **ορίζοντα γεγονότων**.



# ΓΘΣ και μετρικός τανυστής

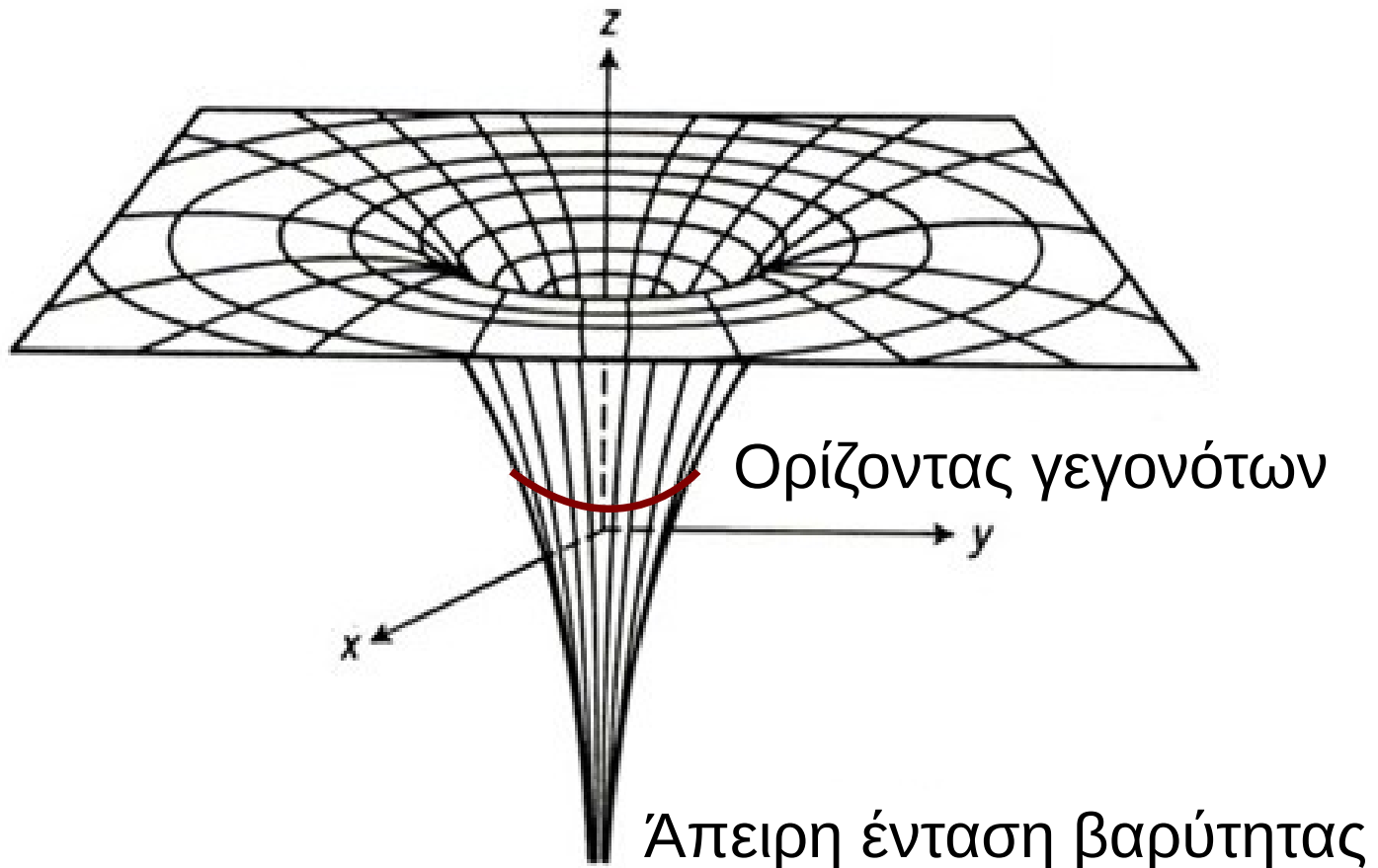
1915: Ο Einstein θεμελιώνει τη Γενική Θεωρία Σχετικότητας

Η καμπύλωση του χωροχρόνου σε 3+1 διαστάσεις περιγράφεται από έναν **μετρικό τανυστή**  $g_{ij}$ .



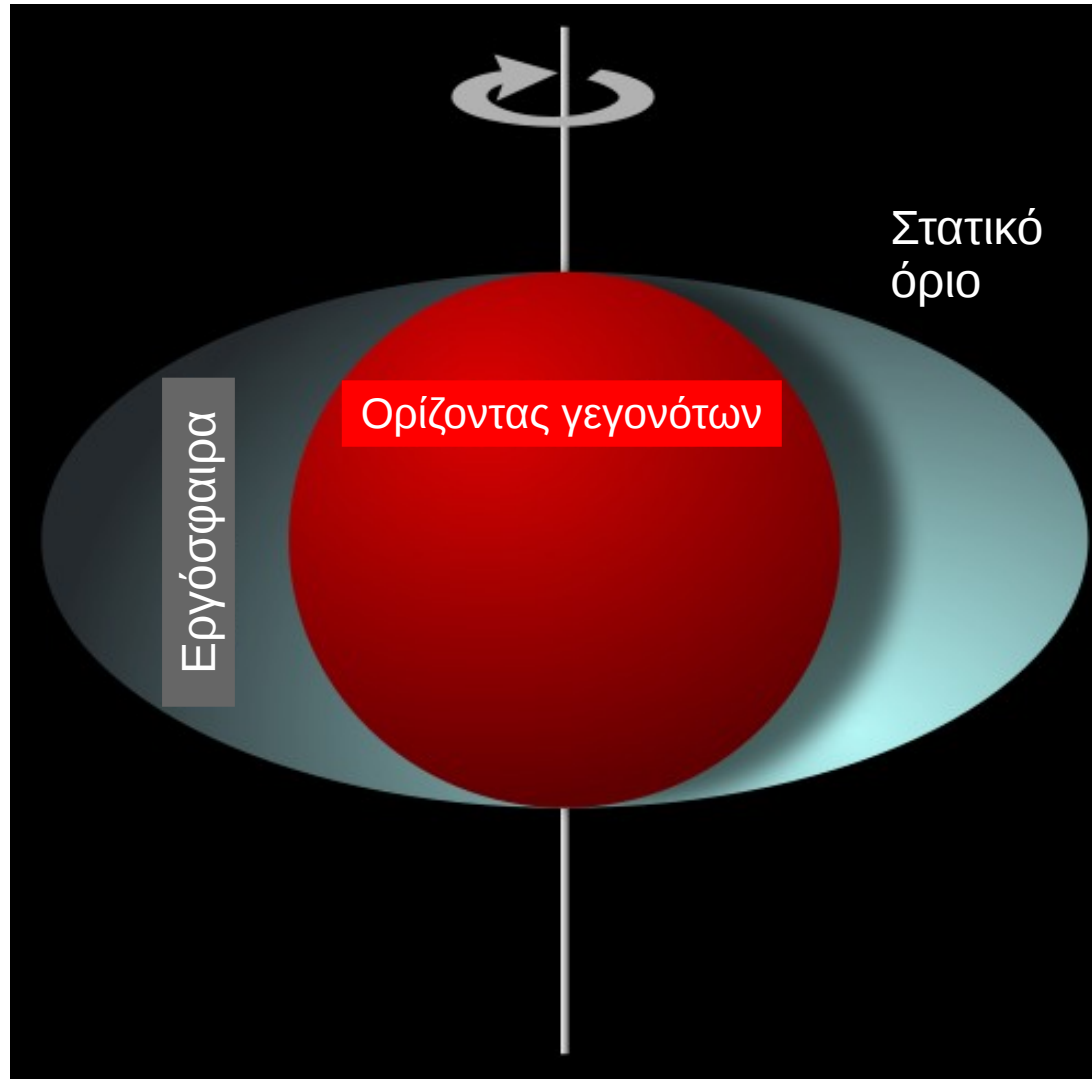
# Η καμπύλωση του χωροχρόνου

Όσο πιο έντονη η βαρύτητα, τόσο πιο έντονη η καμπύλωση του χωροχρόνου.



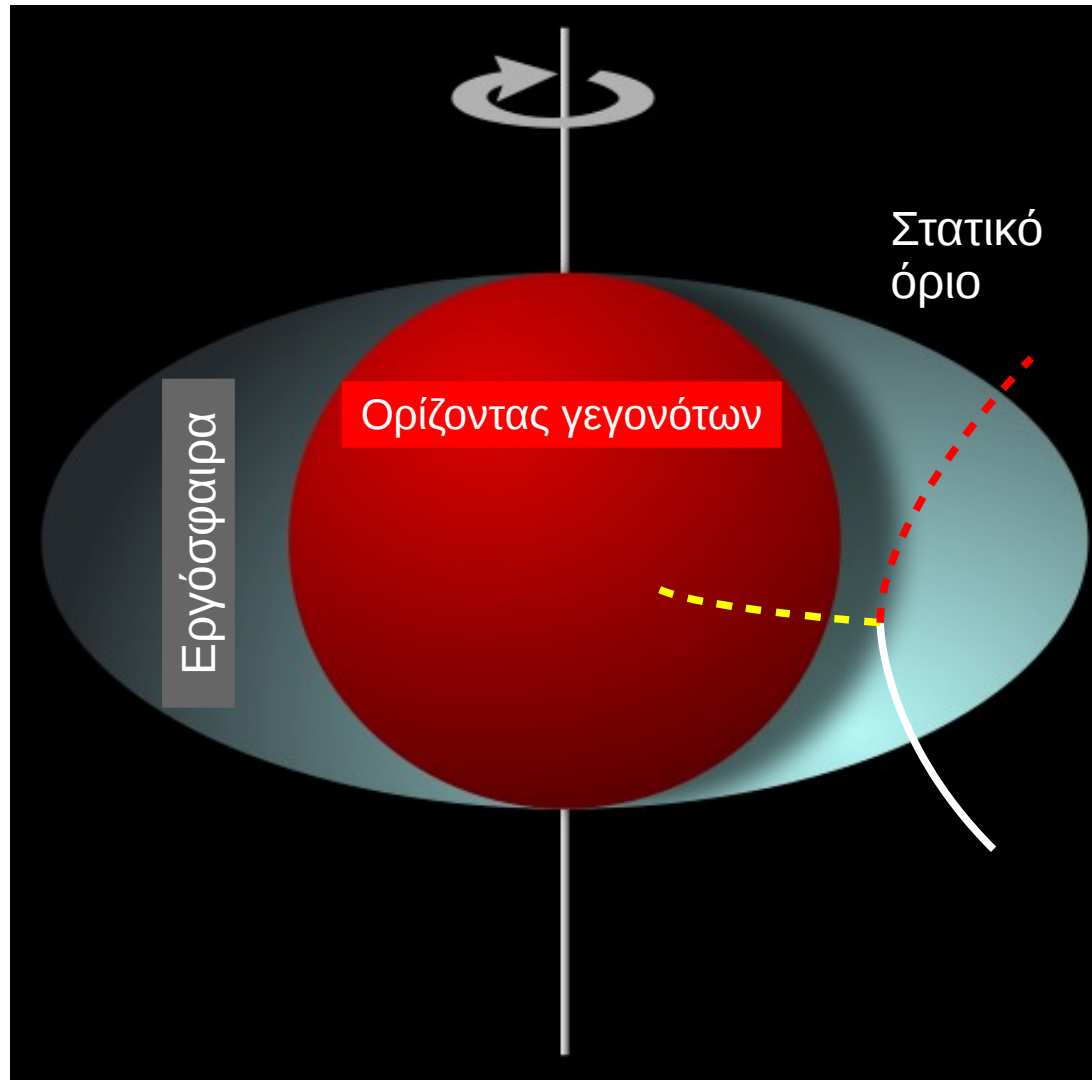
# Περιστρεφόμενη μελανή οπή

Η λύση της ΓΘΣ για περιστρεφόμενες μελανές οπές ανακαλύφθηκε από τον Kerr.



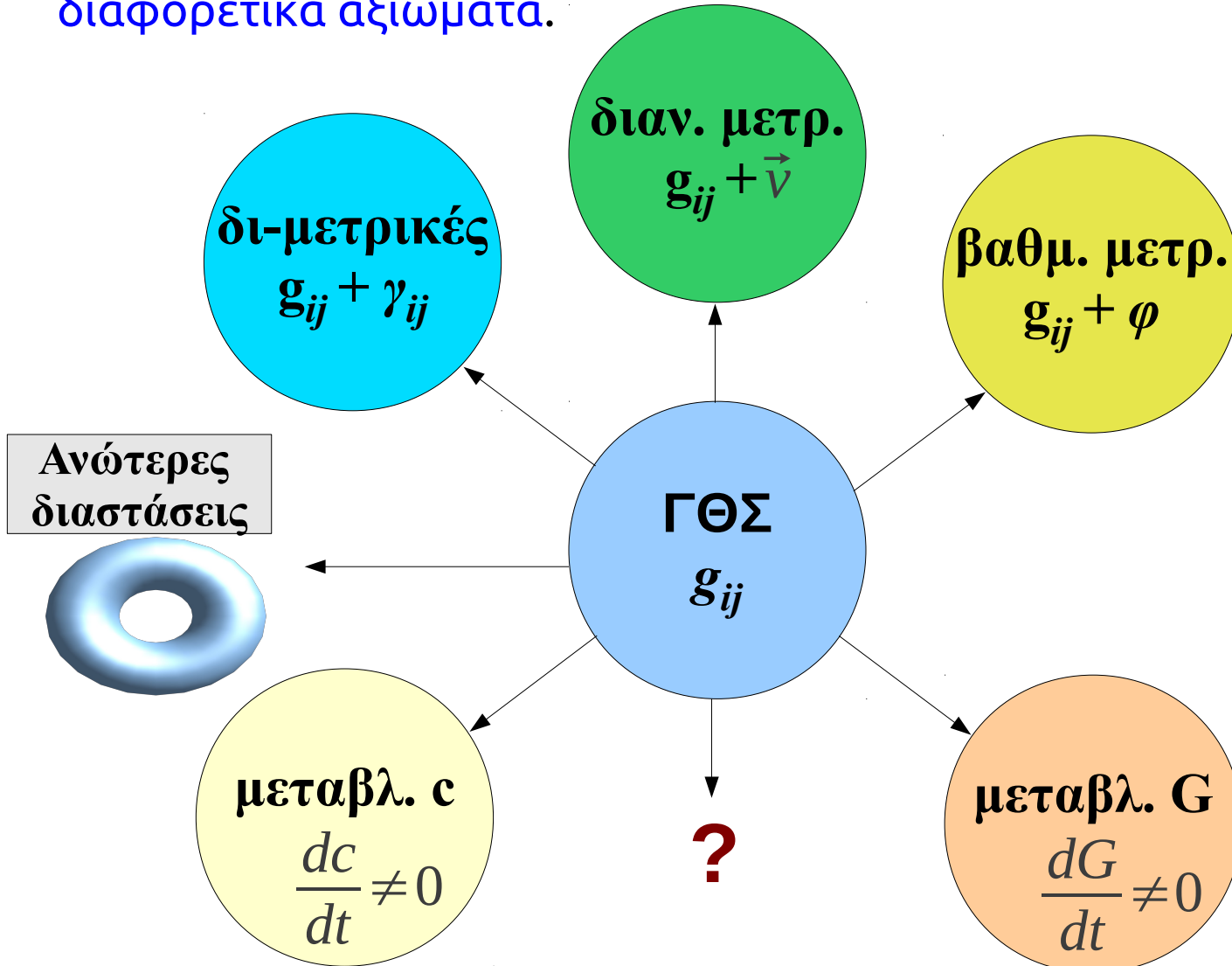
# Μηχανισμός Penrose

Η διάσπαση ενός σωματιδίου εντός της εργόσφαιρας μπορεί να **εξάγει ενέργεια** από την περιστροφή της μελανής οπής.



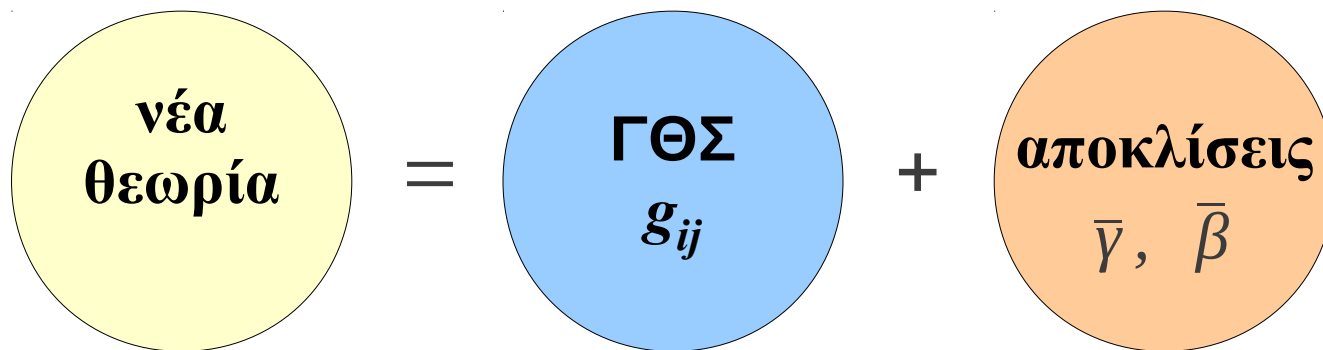
# Επεκτάσεις της ΓΘΣ

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  $\bar{\gamma}$ ,  $\bar{\beta}$ .

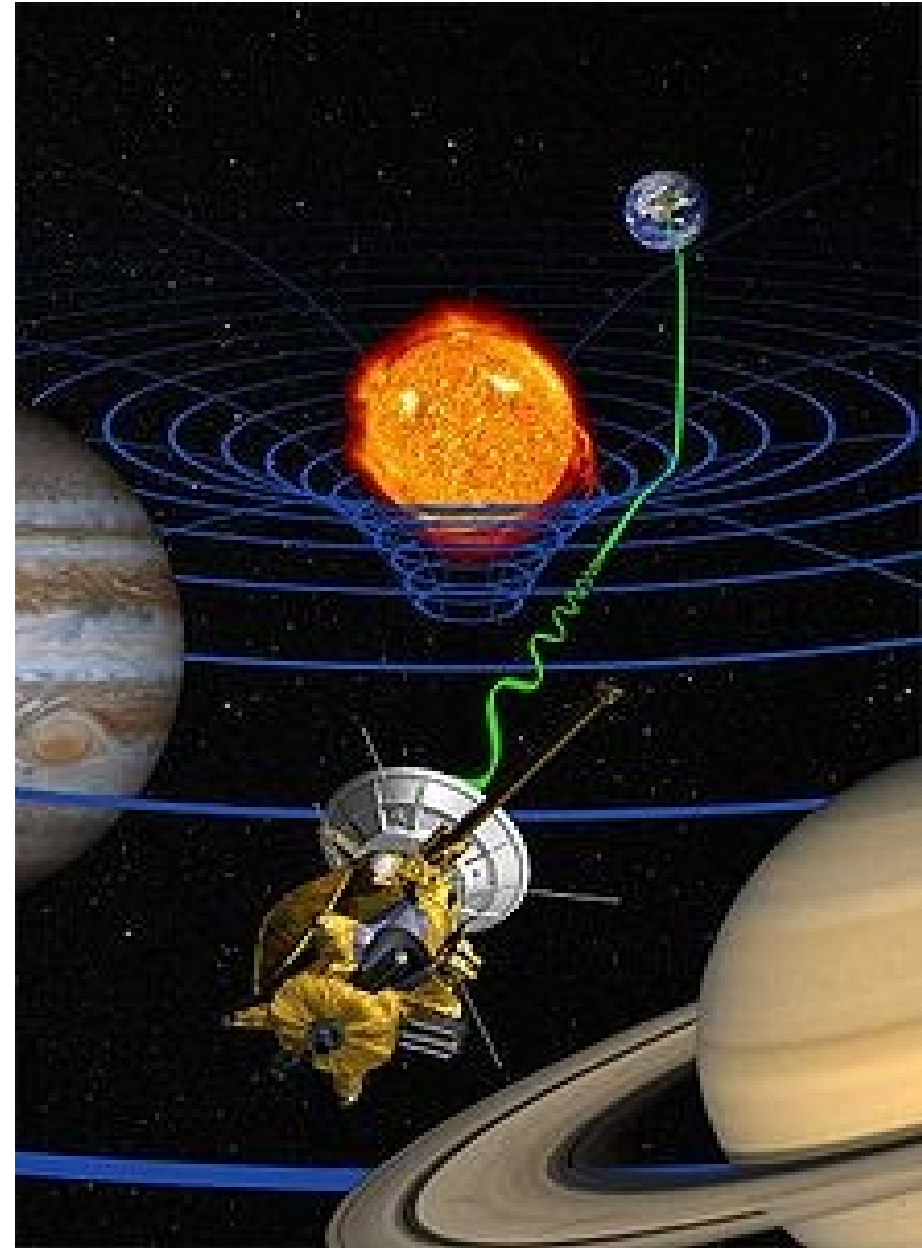
Εάν βρεθεί πειραματικά ότι έχουν **μη-μηδενικές τιμές**, τότε η ΓΘΣ θα αντικατασταθεί από μια νέα, πιο ακριβή θεωρία.

# Πειραματικός έλεγχος της παραμέτρου $\bar{\gamma}$

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

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





# Μελανές οπές σε 5 διαστάσεις

Σε 5-διάστατες θεωρίες βαρύτητας, έχουν υπάρξουν μελανές οπές με πολύ πιο περίπλοκους ορίζοντες γεγονότων από ό,τι στη ΓΘΣ.



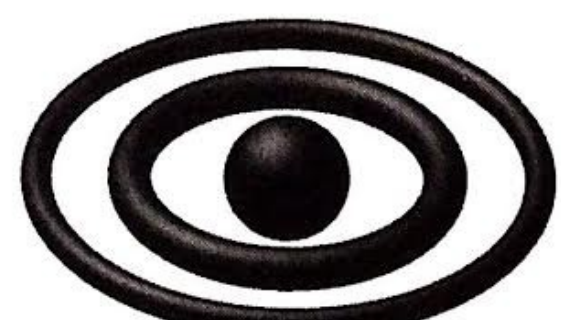
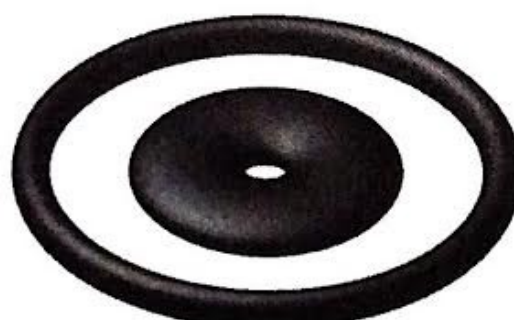
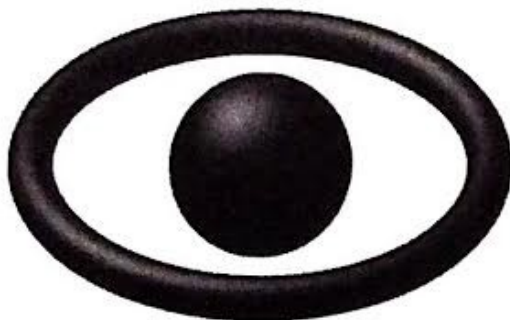
(a)



(b)

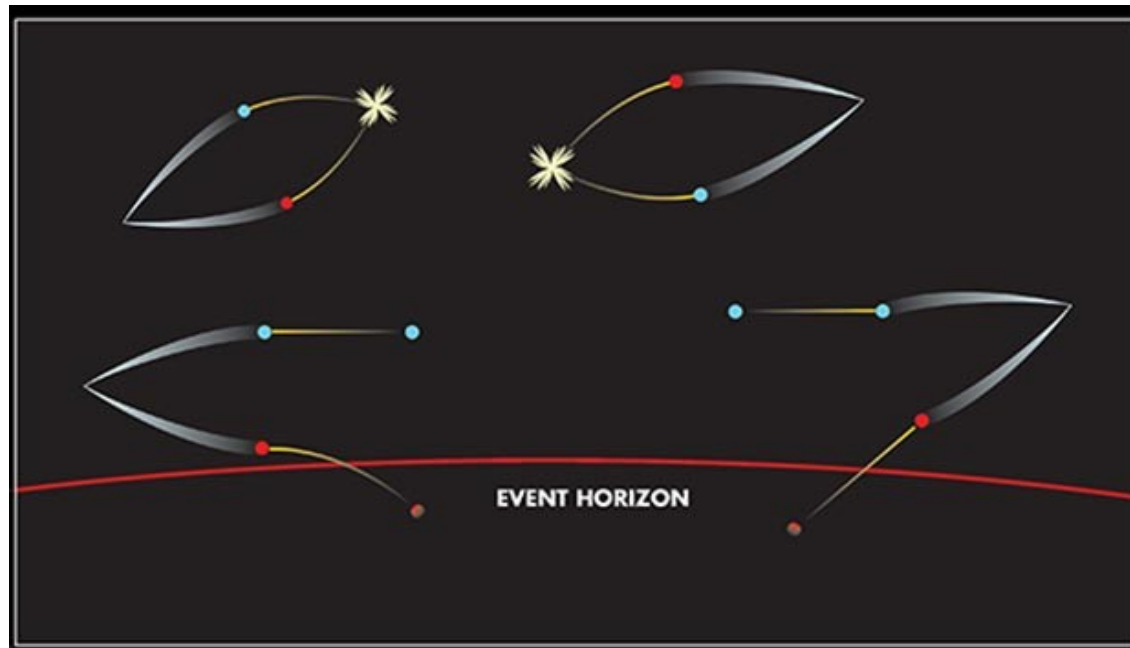


(c)



# Ακτινοβολία Hawking

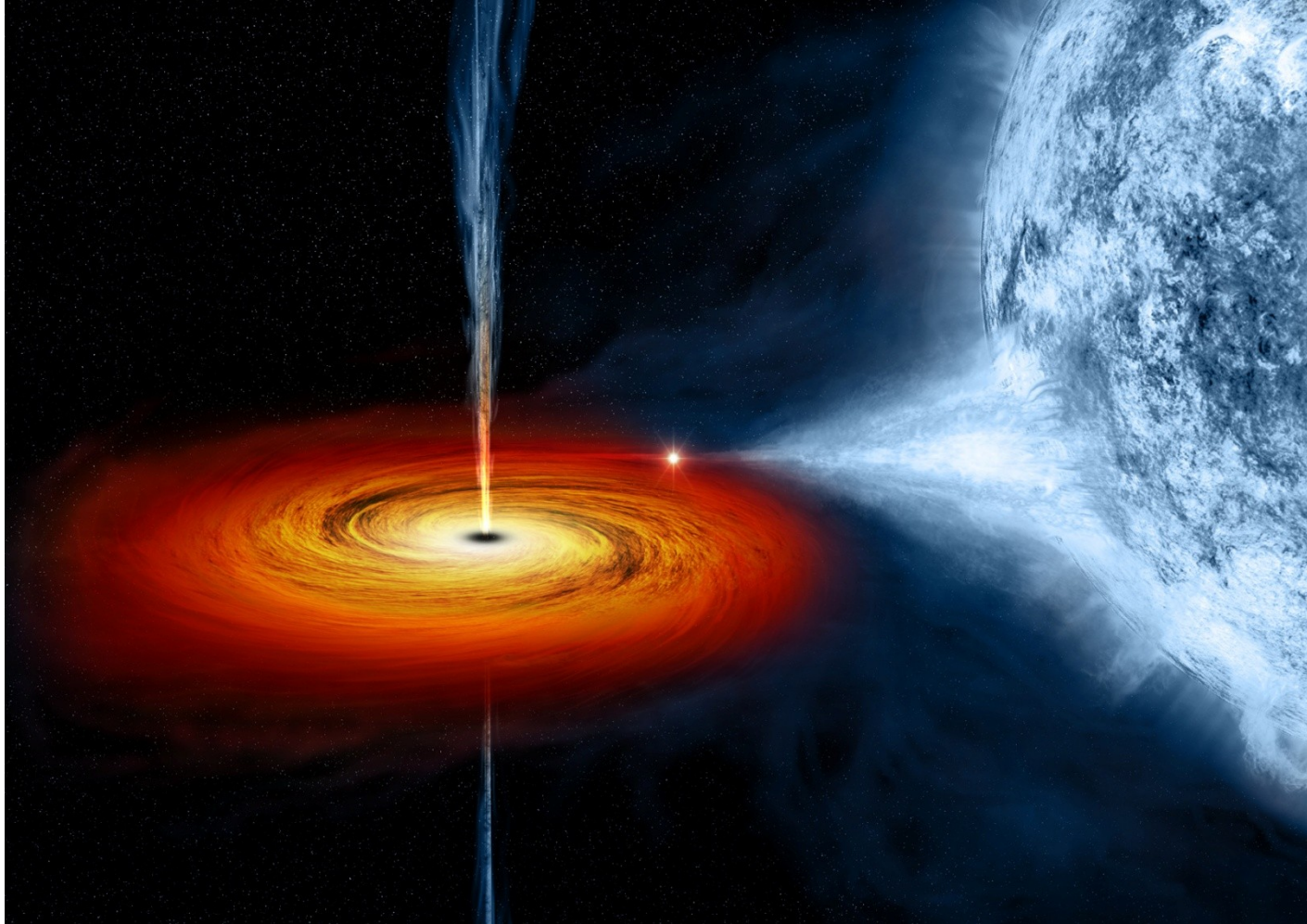
Σε πρώτη προσέγγιση, αν λάβουμε υπόψη τις κβαντομηχανικές ιδιότητες του κενού κοντά στον ορίζοντα γεγονότων, οι μελανές οπές ακτινοβολούν!



Οι μελανές οπές μάλλον δεν είναι εντελώς “μαύρες”.

# Μελανή Οπή σε Διπλό Σύστημα

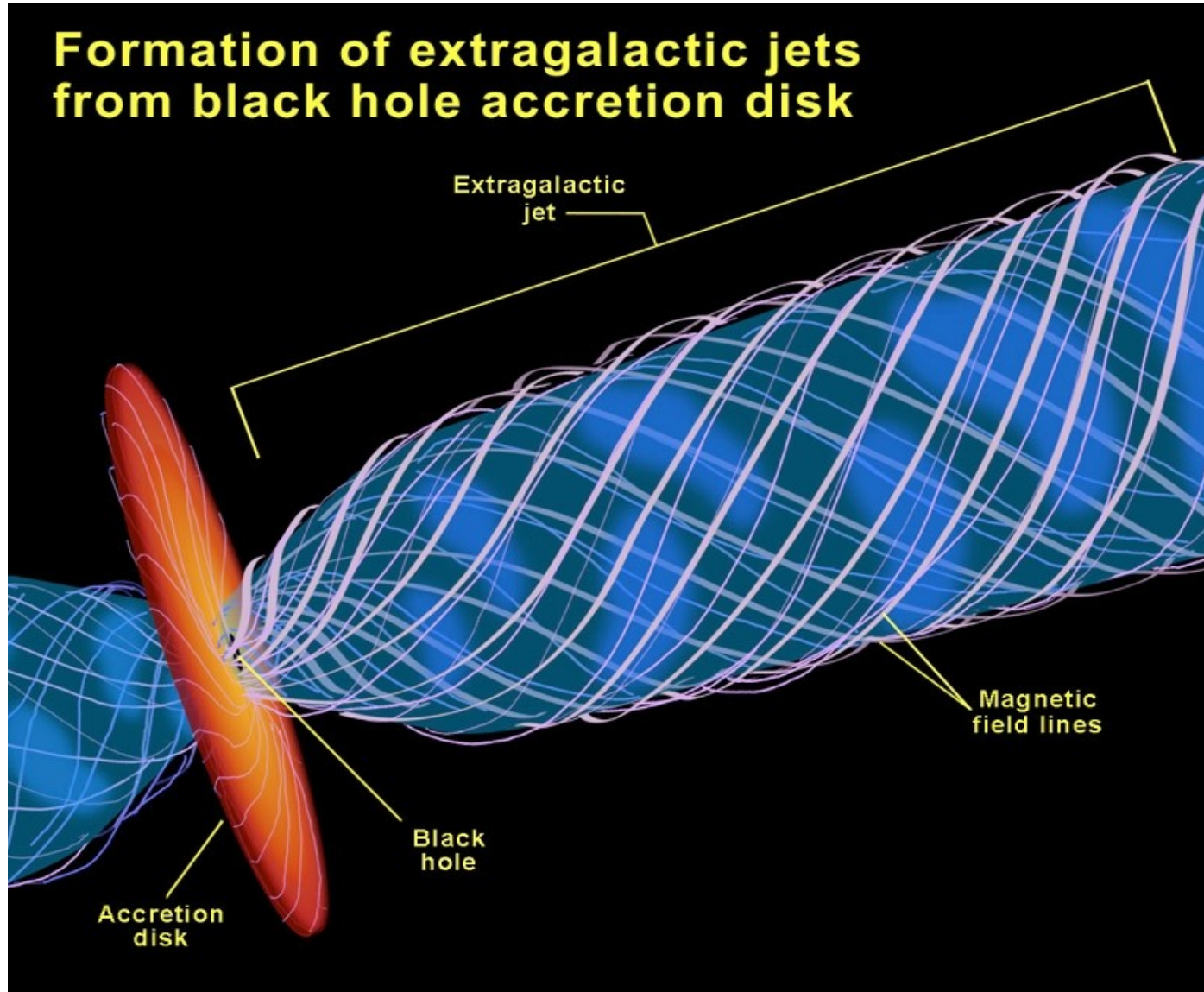
Δημιουργείται Δίσκος Προσαύξησης: Έντονη ακτινοβολία στις Ακτίνες-Χ  
Δημιουργία πίδακα ύλης με ταχύτητες κοντά σ' αυτή του φωτός



(Καλλιτεχνική αναπαράσταση δίσκου προσαύξησης)

# Δημιουργία Πίδακα

Ο πίδακας σταθεροποιείται από μαγνητικά πεδία.



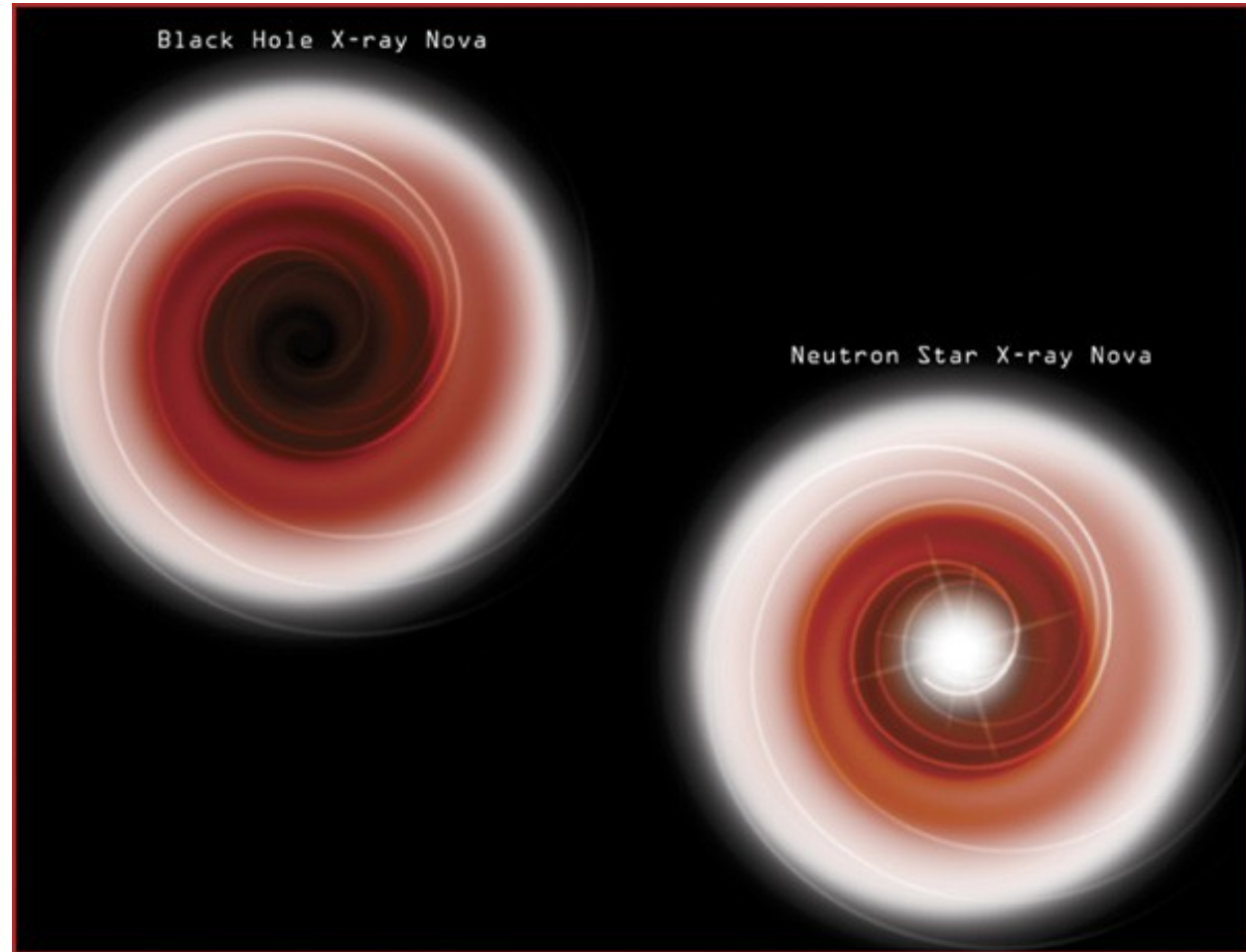
# Διαφορά Μελανής Οπής και Αστέρων Νετρονίων

## ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ:

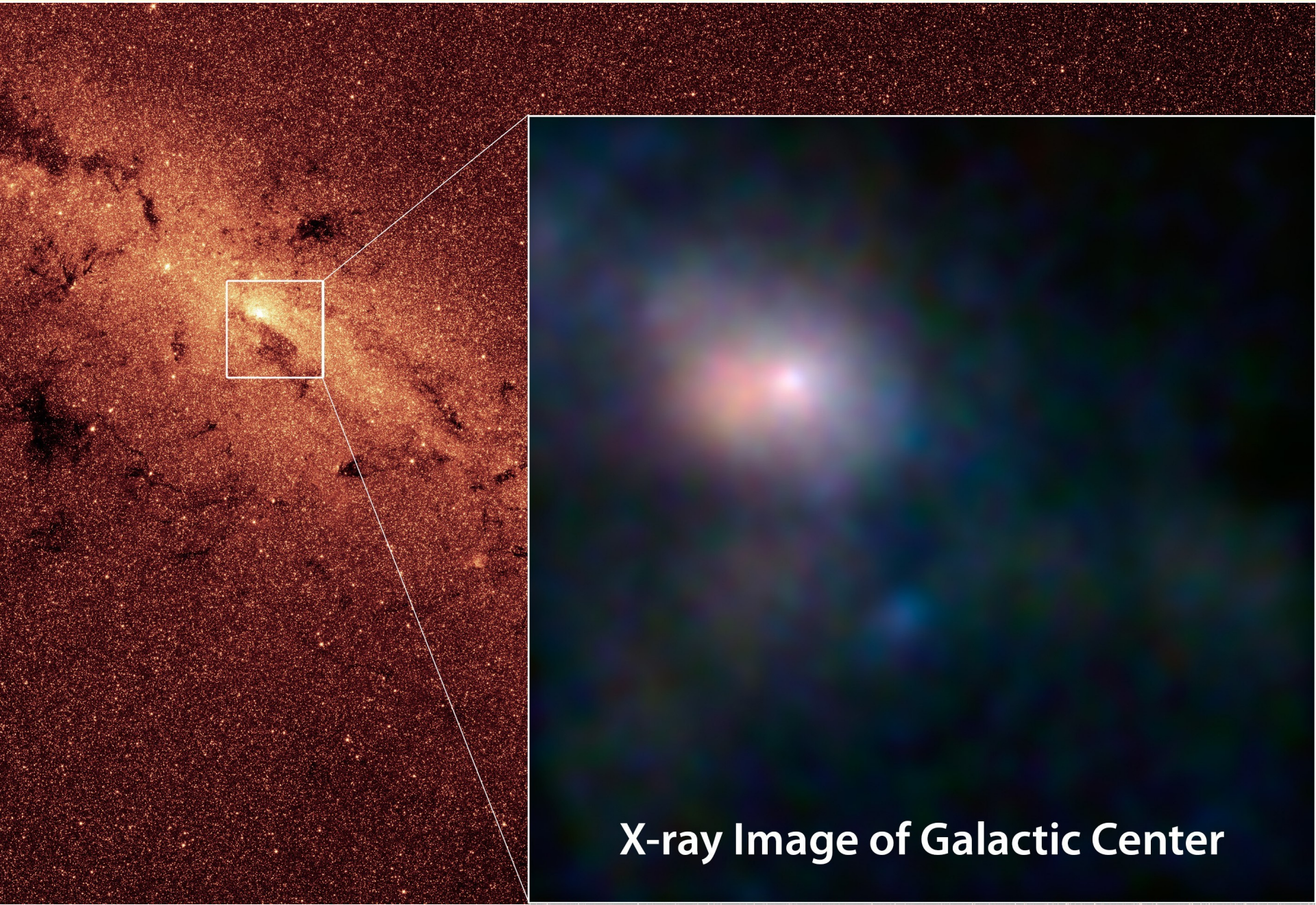
Η ύλη περνά τον ορίζοντα γεγονότων χωρίς έκλαμψη.

## ΑΣΤΕΡΑΣ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ:

Η ύλη συγκρούεται με την επιφάνεια του αστέρα: **έκλαμψη!**

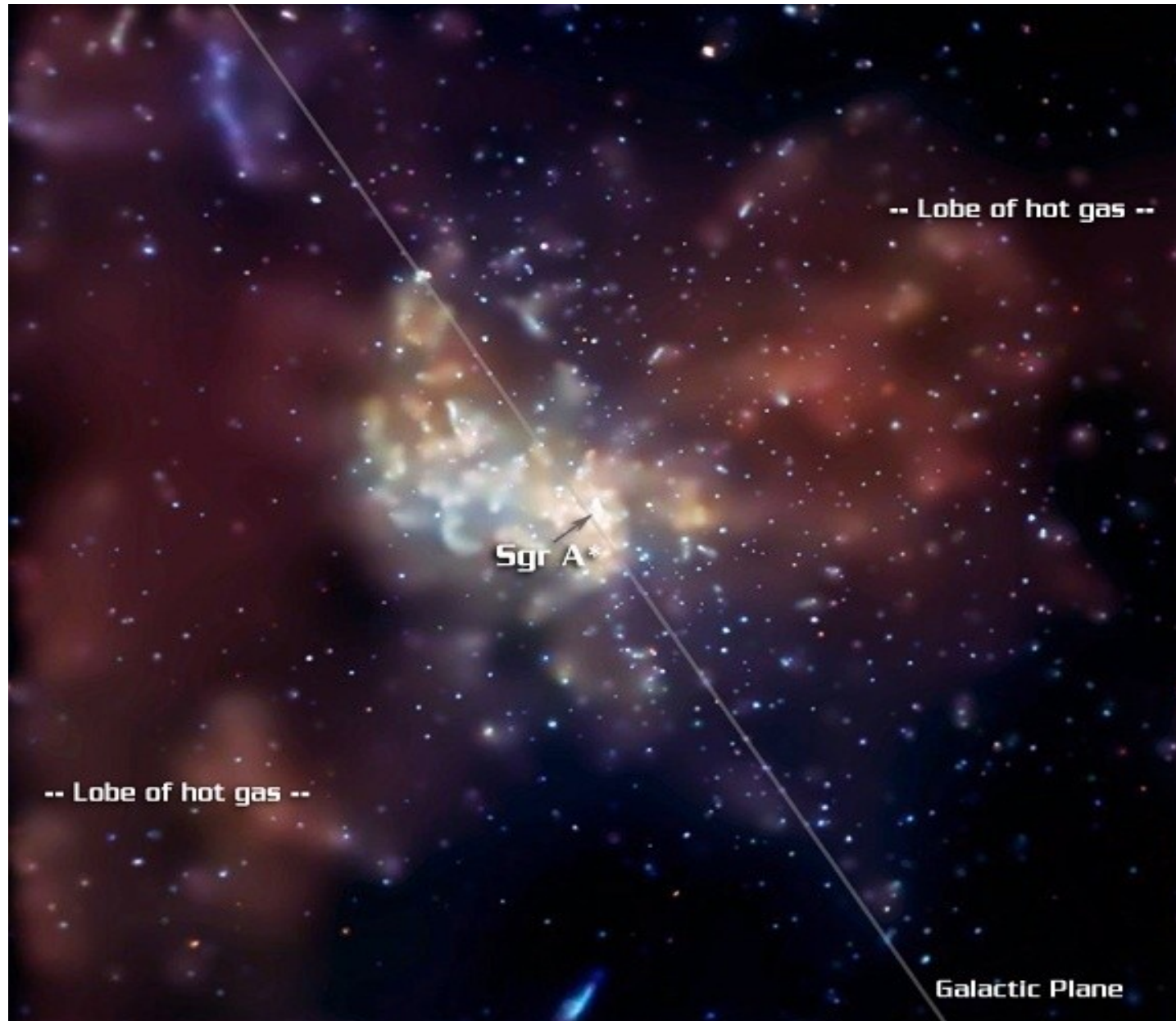


# Μελανή οπή στο κέντρο του Γαλαξία (Sgr A\*)



X-ray Image of Galactic Center

# Μελανή οπή στο κέντρο του Γαλαξία (Sgr A\*)



# Μελανή οπή στο κέντρο του Γαλαξία (Sgr A\*)

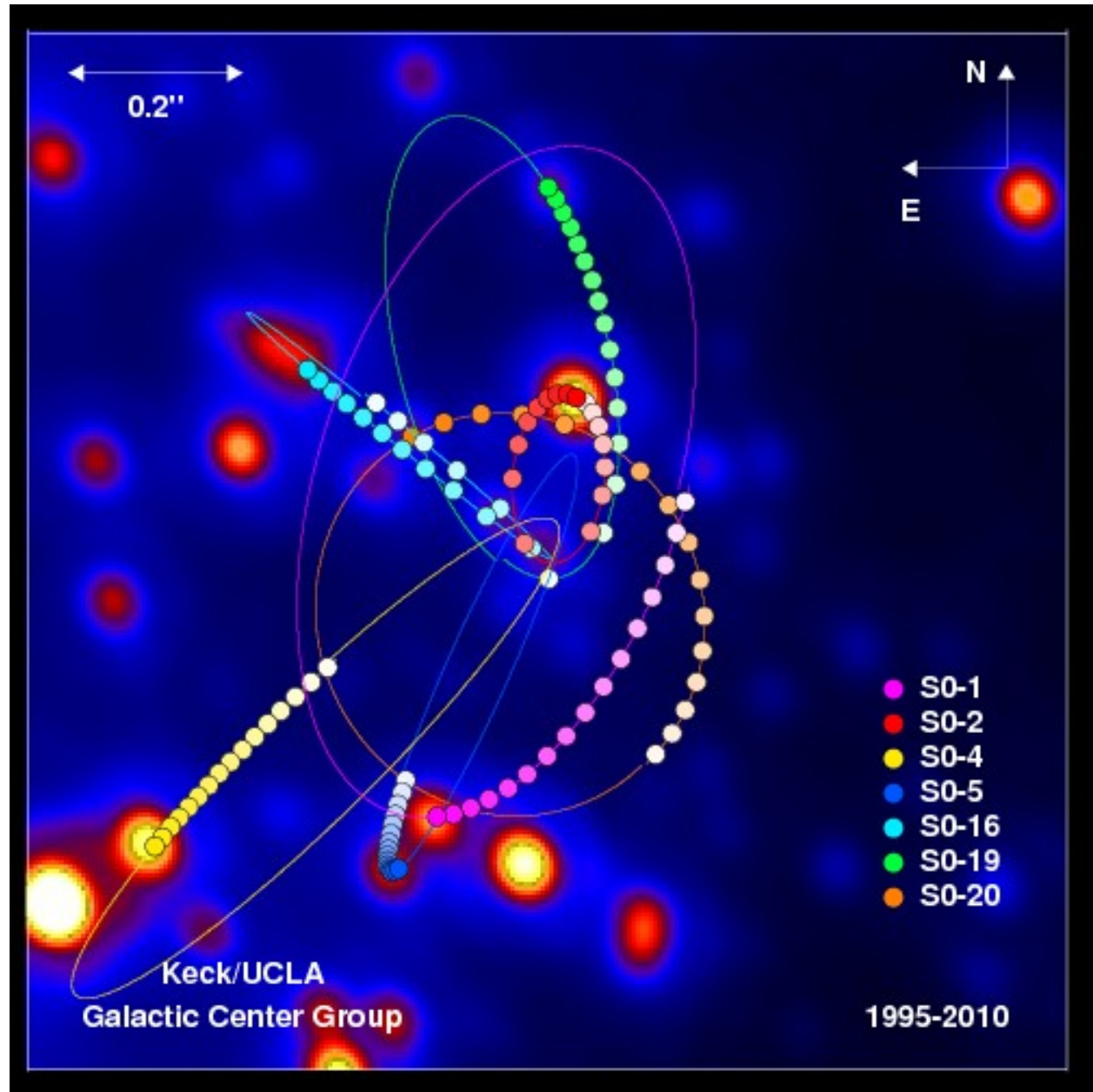
Απόσταση από εμάς:

26000 έτη φωτός

Κίνηση άστρων γύρω  
από τον Sgr A\*

Μάζα μελανής οπής:

4 εκατομμύρια  
ηλιακές μάζες



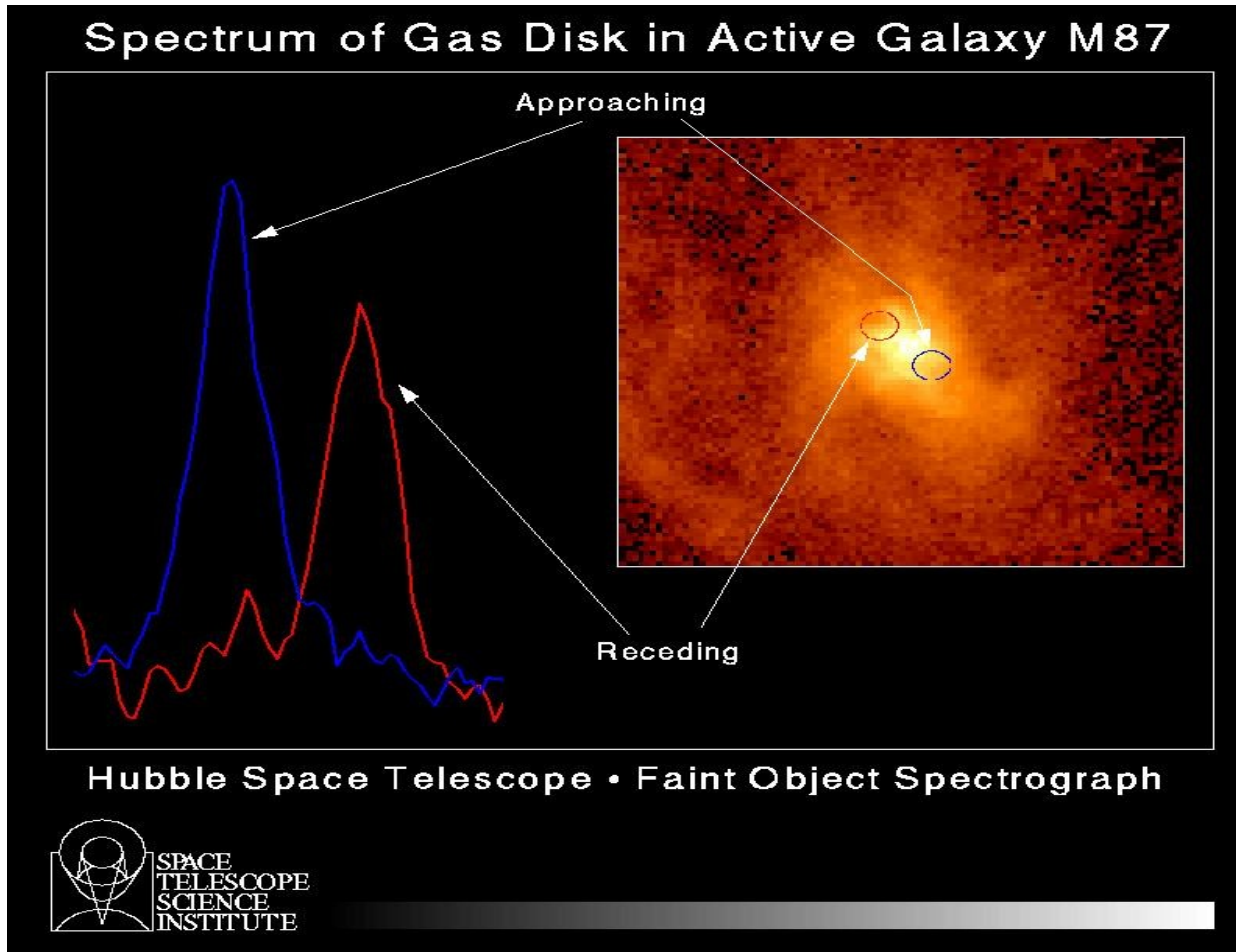


# Μέτρηση Ταχυτήτων Κοντά στη Μελανή Οπή M87

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

Μετάθεση Doppler γνωστών φασματικών γραμμών: ταχύτητες  $\sim 550$  km/s.

Μάζα: 6.5 δισεκατομμύρια ηλιακές μάζες.

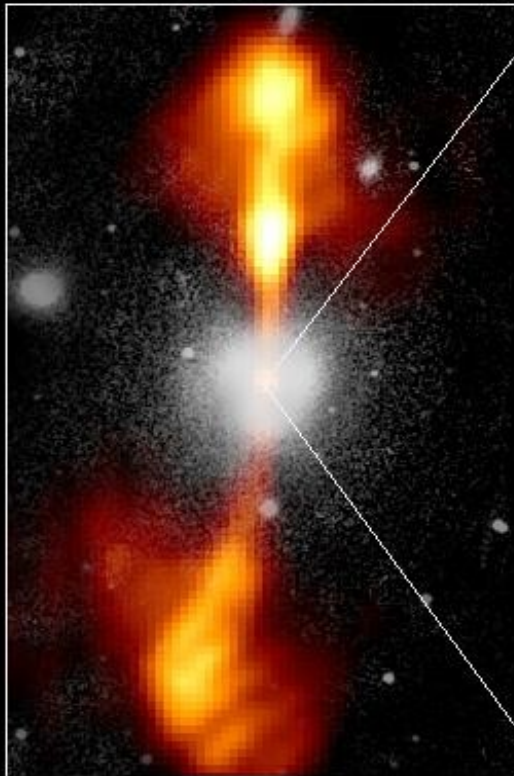


# Πίδακας Από Γαλαξιακή Μελανή Οπή

## Core of Galaxy NGC 4261

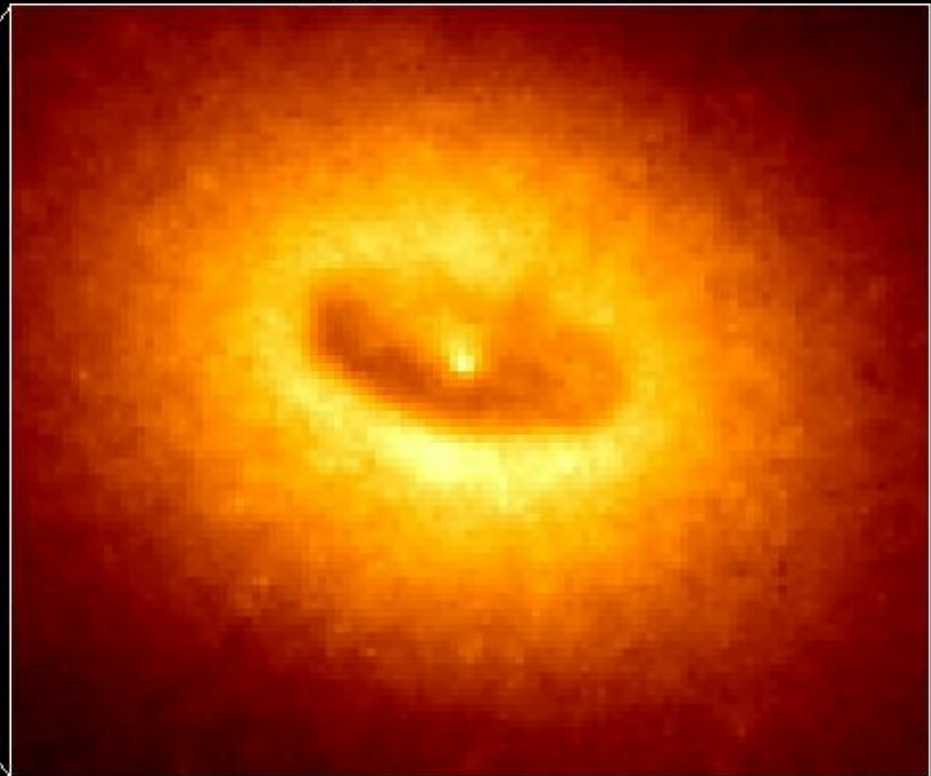
Hubble Space Telescope  
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



380 Arc Seconds  
88,000 LIGHTYEARS

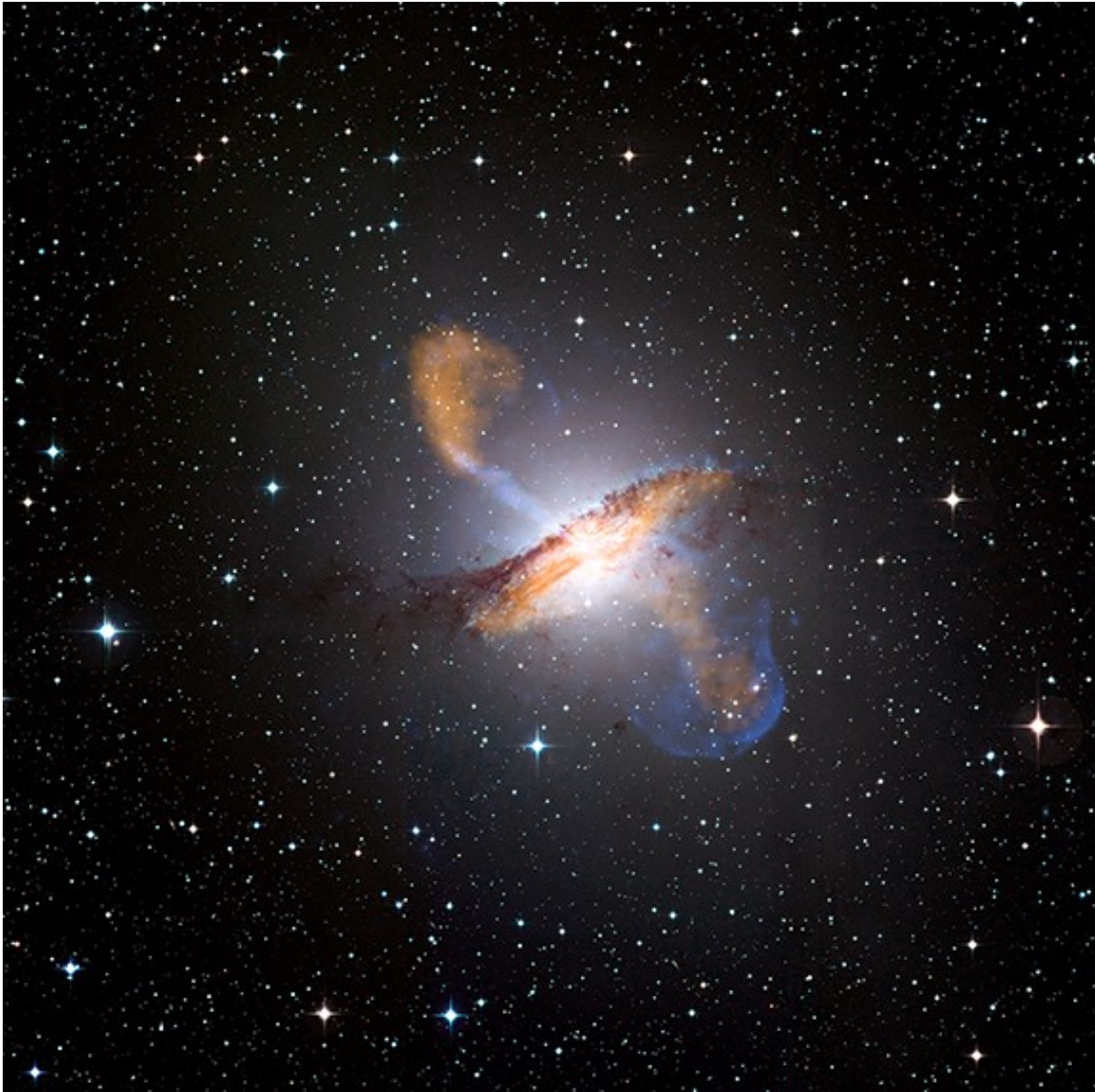
HST Image of a Gas and Dust Disk



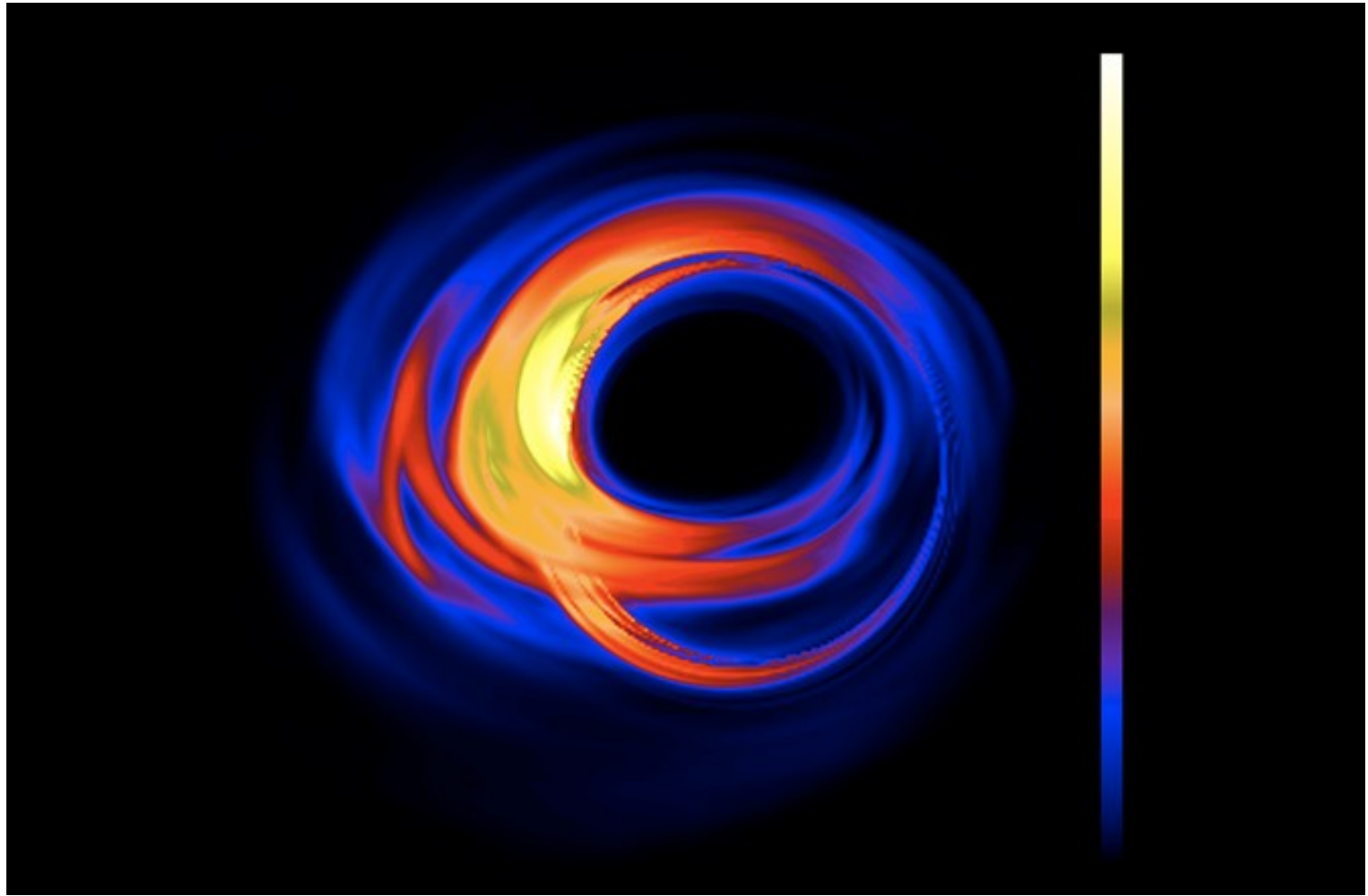
17 Arc Seconds  
400 LIGHTYEARS

# Συνδυασμός Παρατηρήσεων

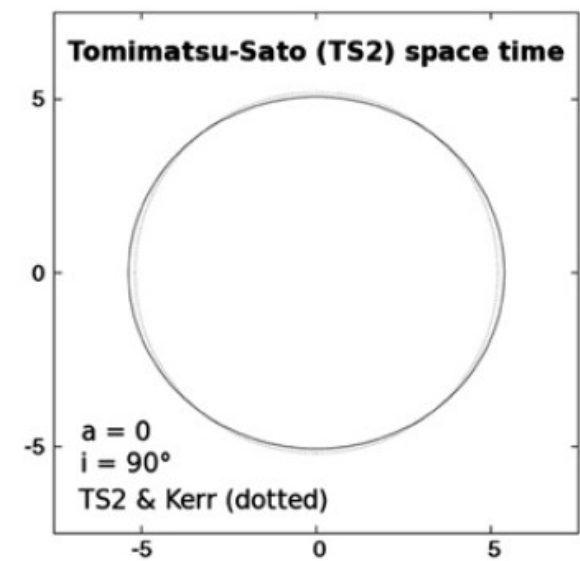
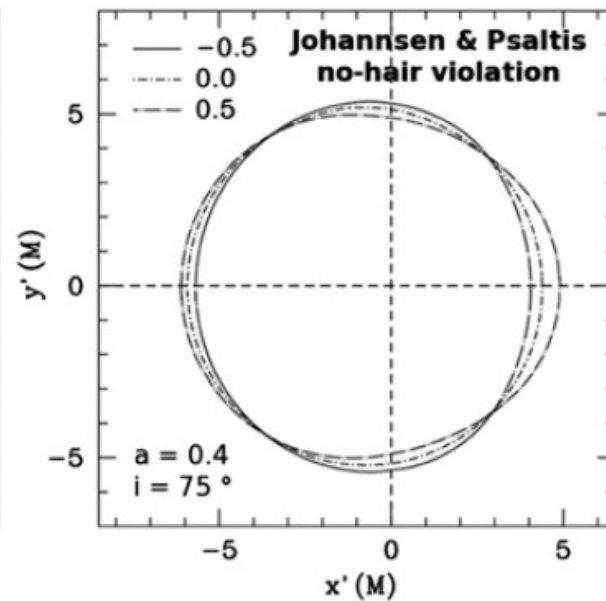
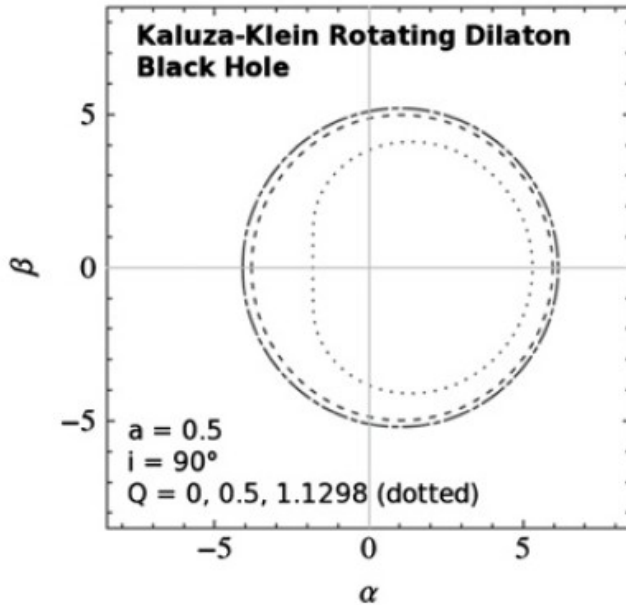
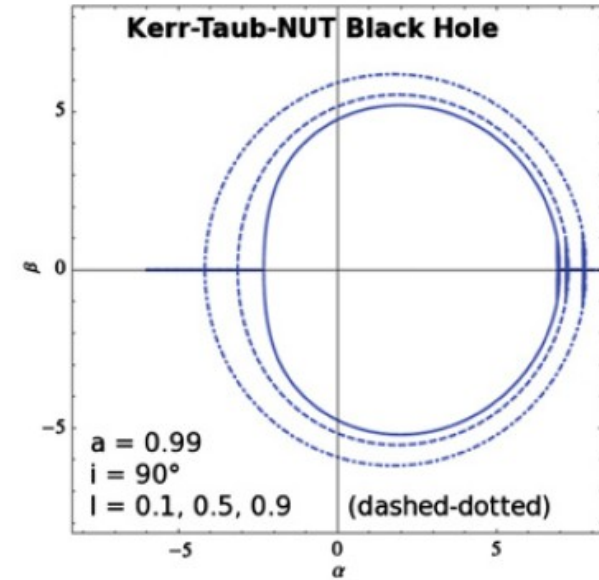
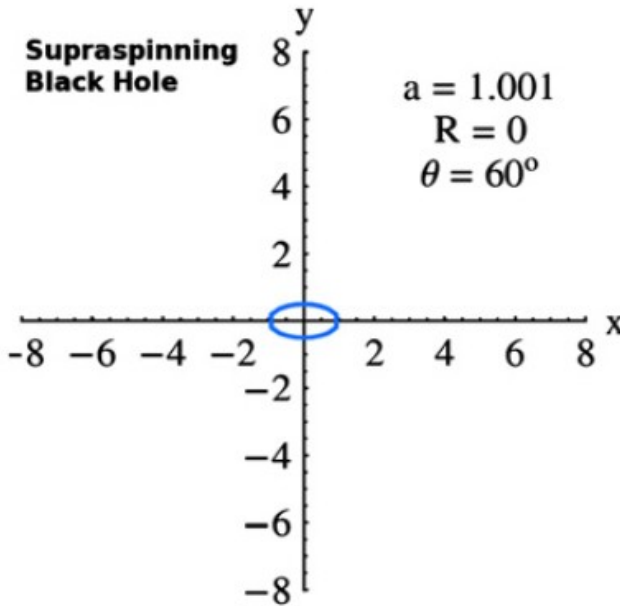
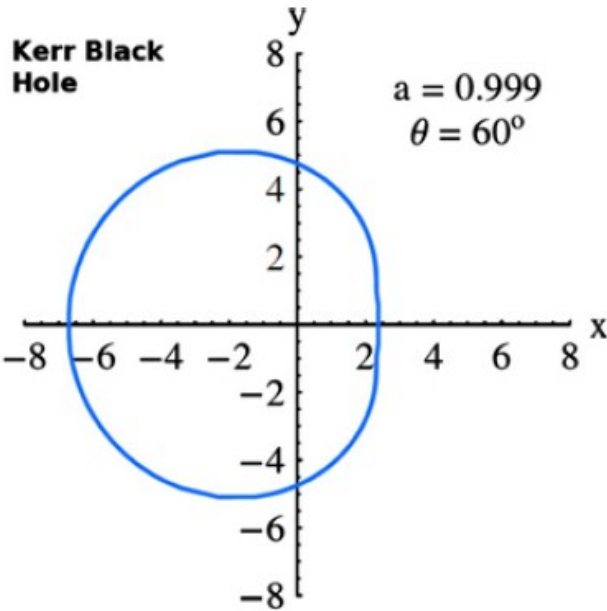
Συνδυασμένες παρατηρήσεις στο οπτικό, ραδιοφωνικό και ακτίνες-Χ



# Η σκιά της μελανής οπής



# Η σκιά της μ. ο. σύμφωνα με διάφορες θεωρίες



# Event Horizon Telescope (EHT)

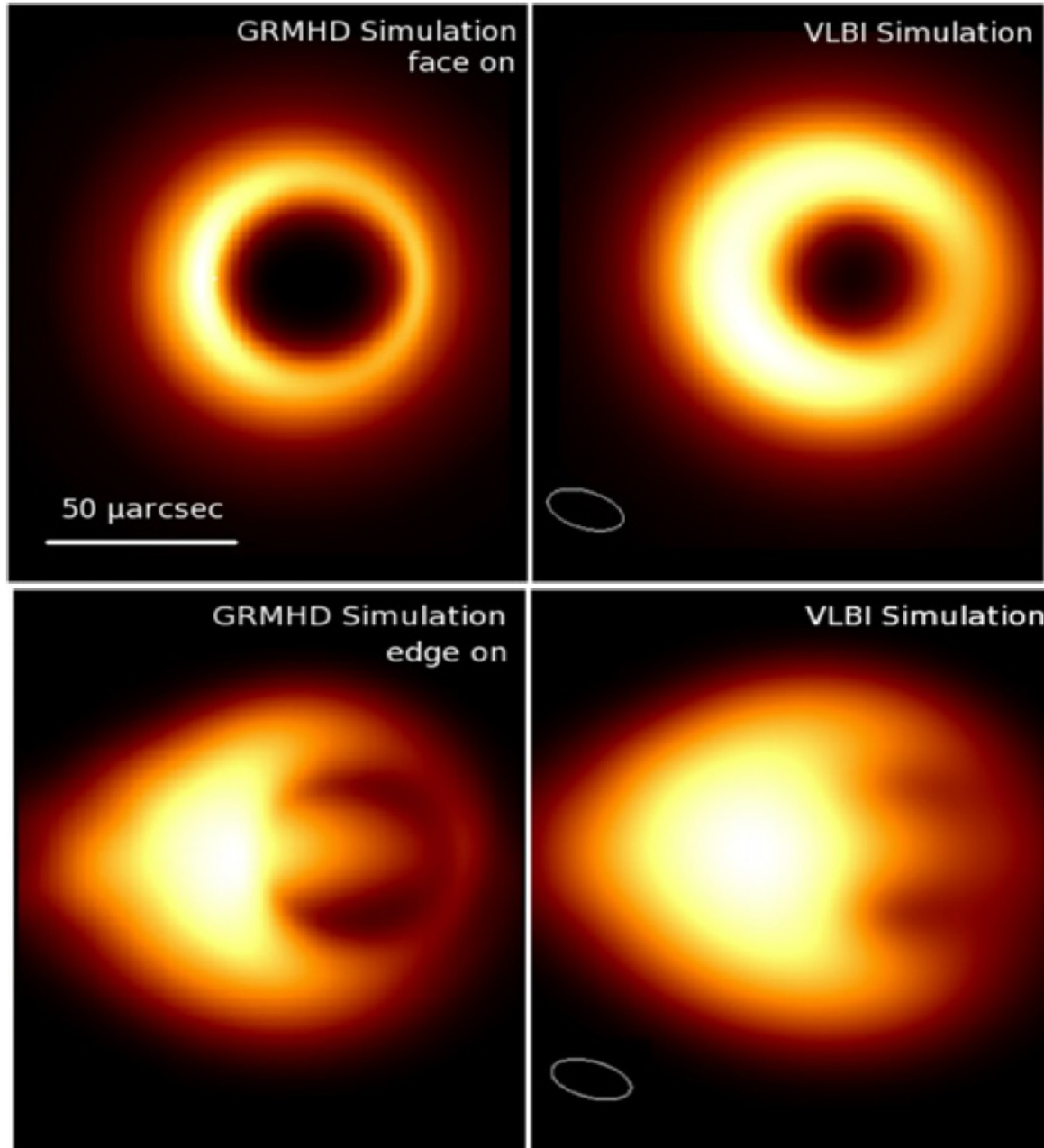
Ένας αριθμός ραδιοτηλεσκοπίων συνδυάζεται συμβολομετρικά, για να πετύχουμε ακρίβεια ίση με ένα τηλεσκόπιο με διάμετρο όση η Γη.



# Ραδιοτηλεσκόπιο ALMA στη Χιλή



# Αναμενόμενες παρατηρήσεις





ΤΕΛΟΣ

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