



# Αστρονομία

## Ενότητα # 11: Τελικές Καταστάσεις (Μελανές Οπές)

Νικόλαος Στεργιούλας  
Τμήμα Φυσικής



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



# Άδειες Χρήσης

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.

Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη 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.

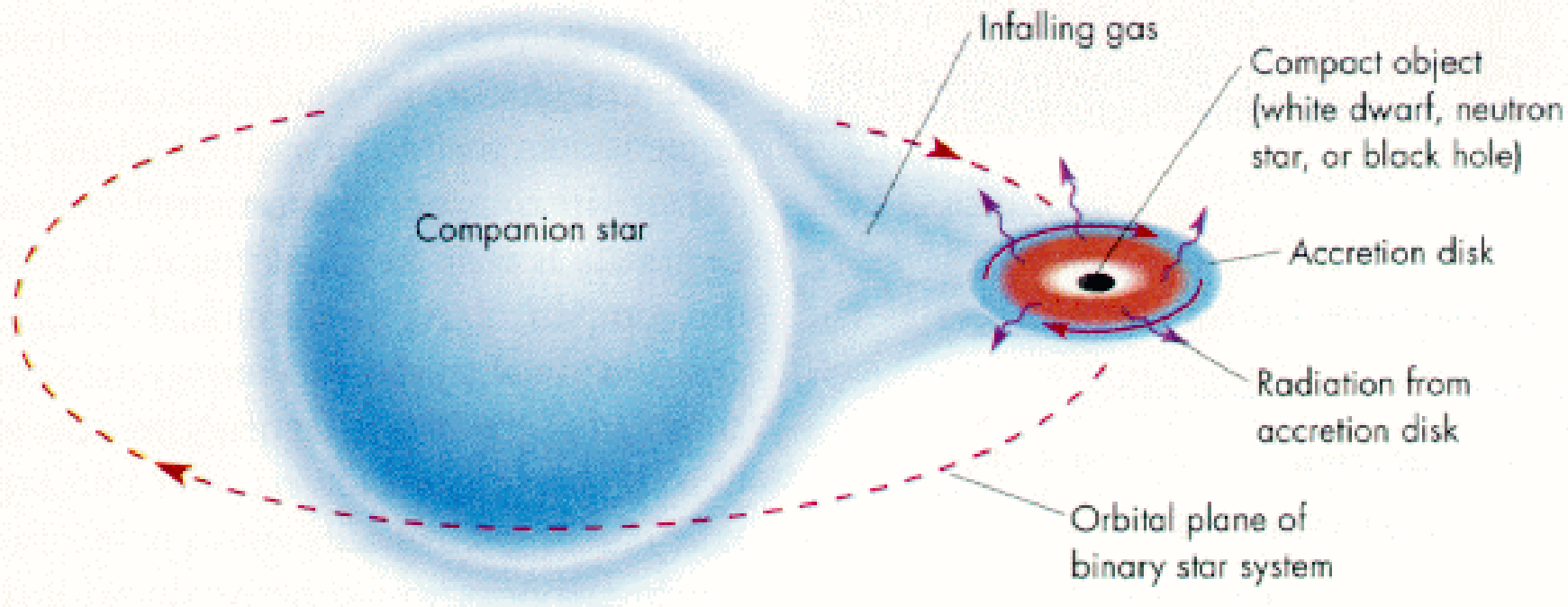


# ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ

- *Κεφ. 11<sup>ο</sup> Τελικές Καταστάσεις (Μελανές Οπές)*

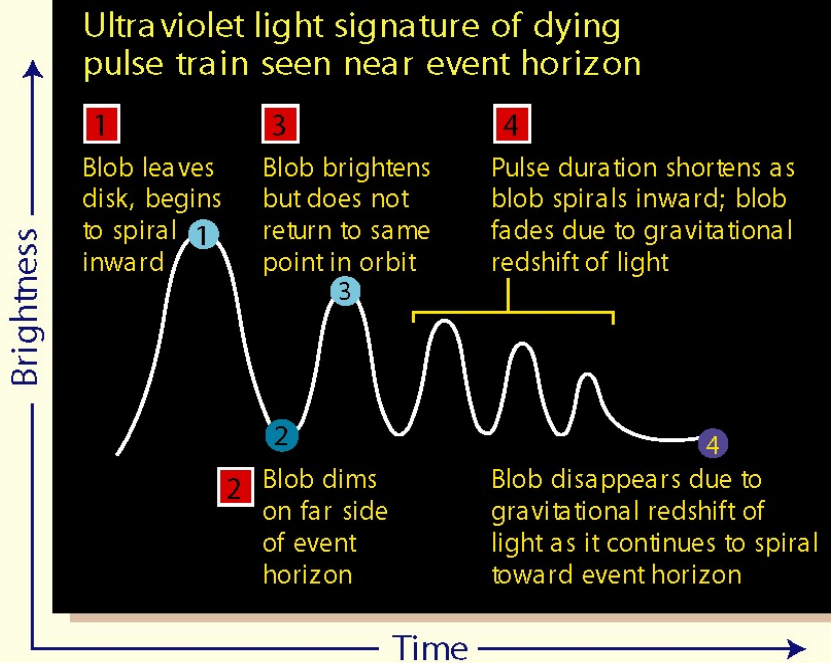
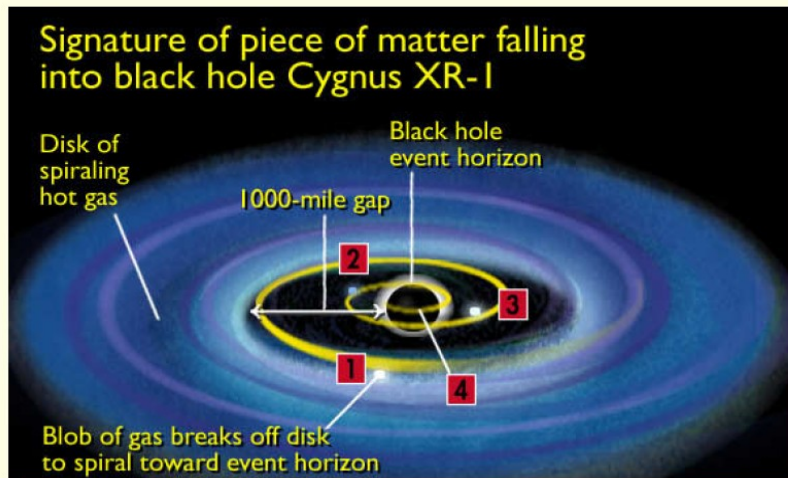
*Ν. Στεργιούλας*

# ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΗ ΥΛΗΣ



**Εικόνα 1:** Στην περίπτωση ύπαρξης υπερκαινοφανούς σε διπλό σύστημα, ο συνοδεύων αστέρας θα επιβιώσει, χάνοντας μόνο μικρό μέρος της ύλης του. Κατά την εξέλιξη του συνοδεύοντα αστέρα σε ερυθρό γίγαντα, ο αστέρας νετρονίων που παρέμεινε από την έκρηξη θα αρχίσει να προσαυξάνει ύλη από τον συνοδεύοντα [1].

# Μ. Ο. ΣΕ ΔΙΠΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΚΤΙΝΩΝ-X



Εικόνα 2: Εκπομπή φωτός από ύλη σε δίσκο προσαύξησης γύρω από μελανή οπή. Η λαμπρότητα εμφανίζει μέγιστα και ελάχιστα κατά την κίνηση της γύρω από τη μελανή οπή, και τελικά εξαφανίζεται λόγω της μεγάλης μετατόπισης προς το ερυθρό [2].

# ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΥΛΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΣΑΥΞΑΝΕΤΑΙ ΣΤΗ ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ

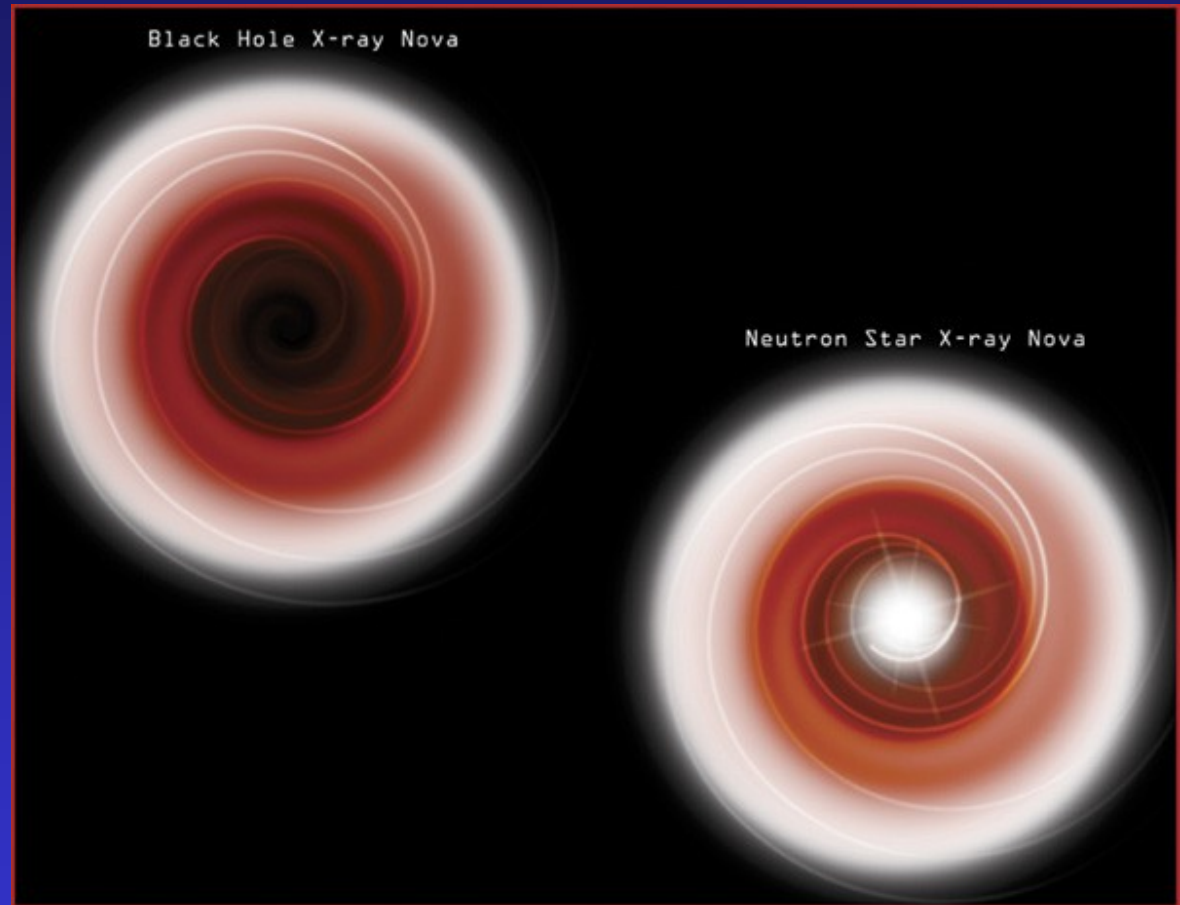
## ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ:

Η ύλη περνά τον ορίζοντα γεγονότων χωρίς έκλαμψη.

## ΑΣΤΕΡΑΣ

## ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ:

Η ύλη συγκρούεται με την επιφάνεια του αστέρα: έκλαμψη!

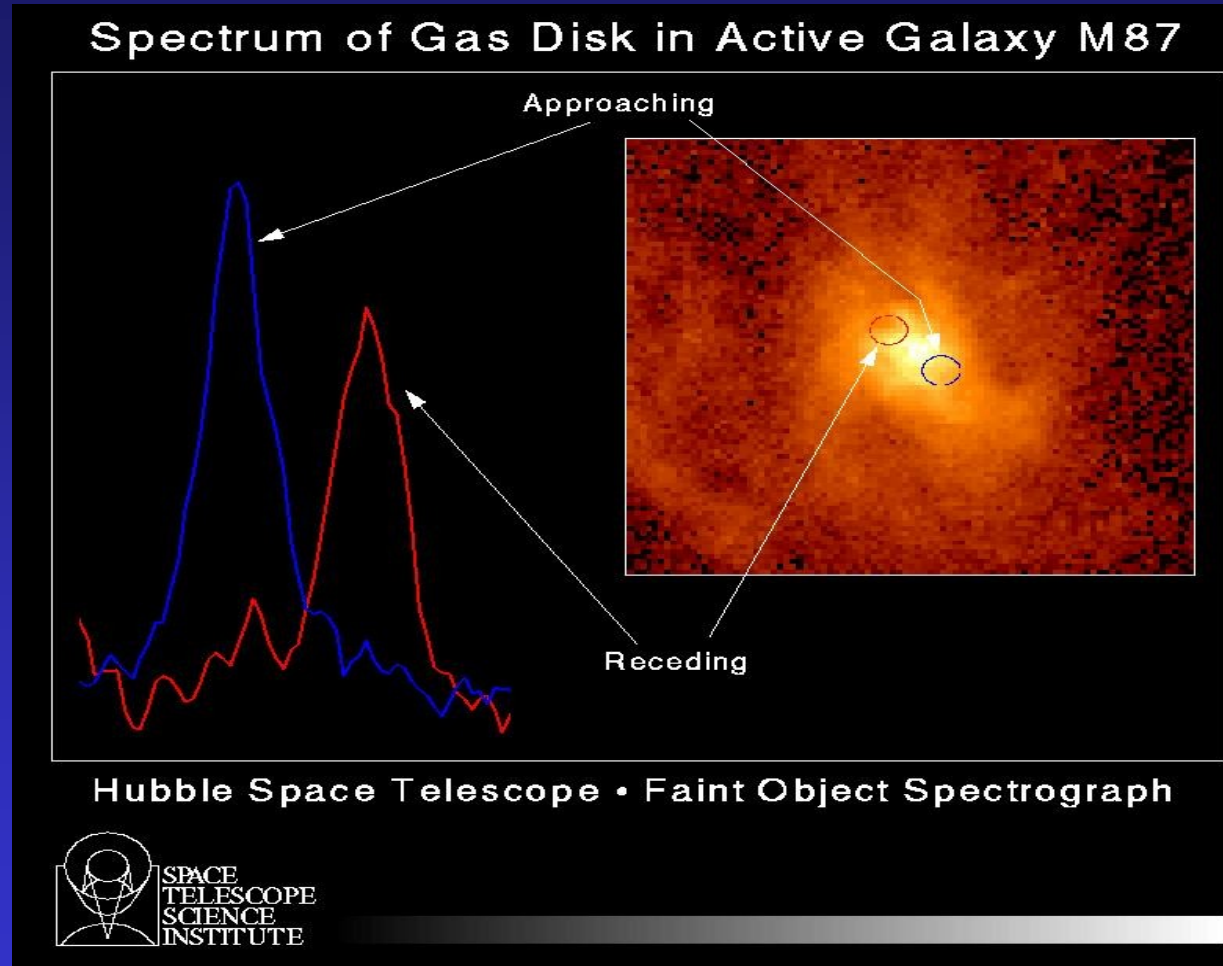


Εικόνα 3: Η βαρυτική μετατόπιση προκαλεί εξασθένηση της έντασης του φωτός, καθώς η ύλη πλησιάζει μια μελανή οπή (αριστερά) ή έναν αστέρα νετρονίων (δεξιά). Στην περίπτωση της μελανής οπής η ύλη διαπερνά τον ορίζοντα γεγονότων, ενώ στην περίπτωση του αστέρα νετρονίων παρατηρείται έκλαμψη όταν η ύλη προσκρούει στην επιφάνειά του [3].

# ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΚΟΝΤΑ ΣΤΗ ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ

Μέσω του φαινομένου της μετάθεσης Doppler γνωστών φασματικών γραμμών μετρήθηκαν ταχύτητες  $\sim 550$  km/s.

Η μάζα που δημιουργεί το βαρυτικό πεδίο είναι 3 δισεκατομμύρια ηλιακές μάζες.



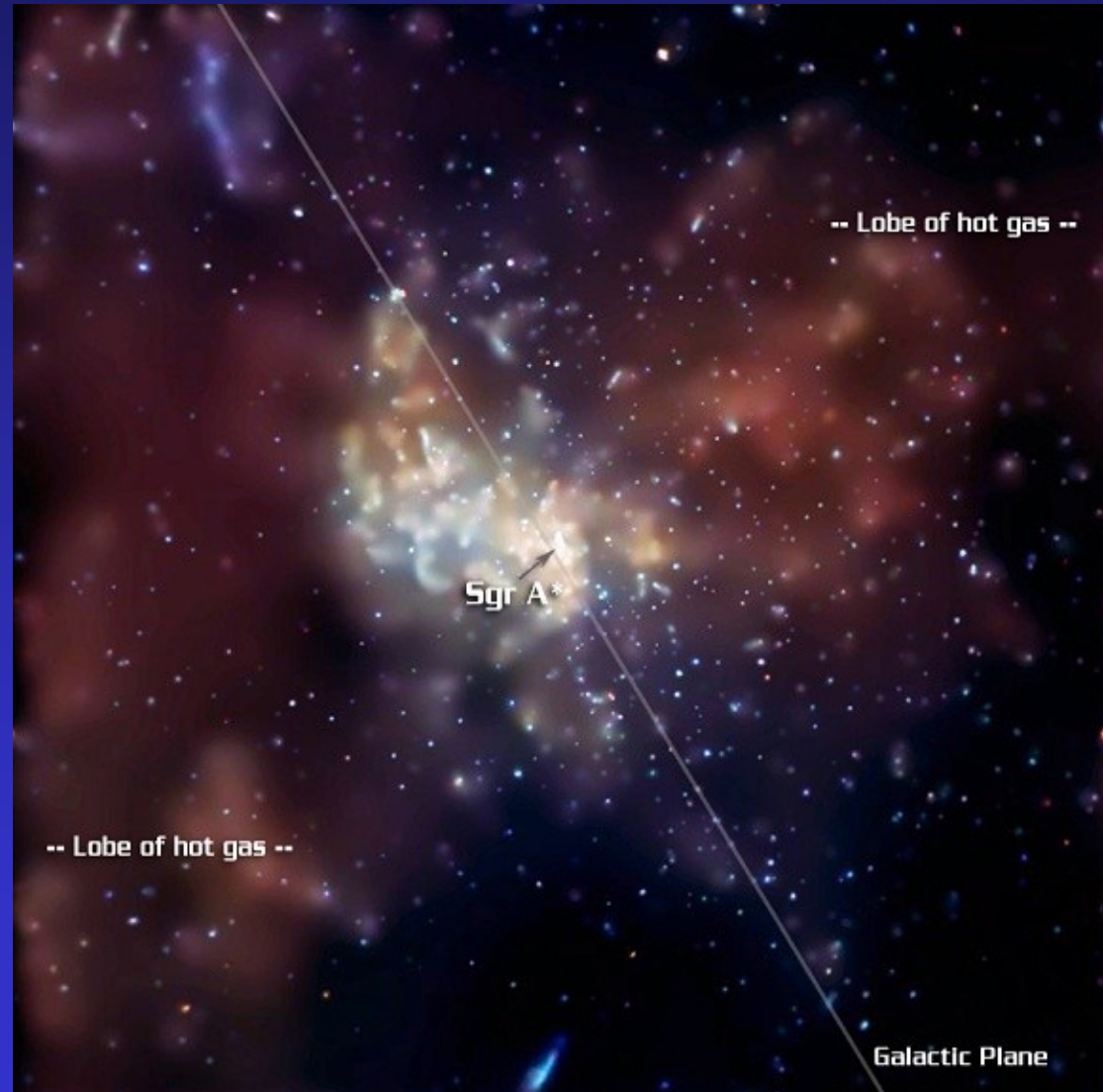
**Εικόνα 4:** Διάγραμμα των ταχυτήτων που μετρήθηκαν σε περιστρεφόμενο δίσκο θερμού αερίου στο κέντρο του ενεργού γαλαξία M87 [4].



# Η ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ ΔΙΚΟΥ ΜΑΣ ΓΑΛΑΞΙΑ

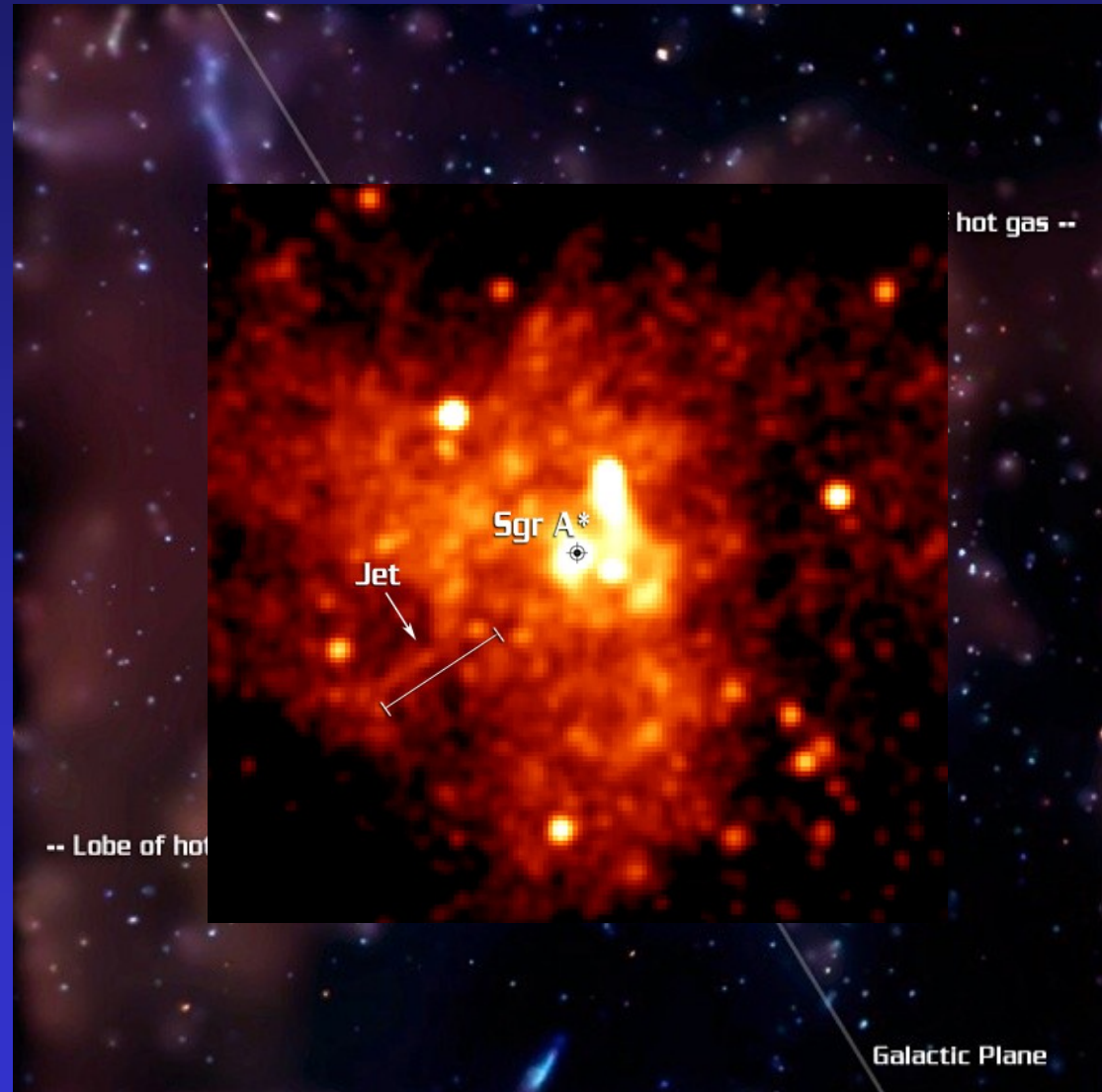
Πρόσφατες παρατηρήσεις στις ακτίνες-Χ αποκαλύπτουν την ύπαρξη πίδακα και λοβών θερμού αερίου.

**Εικόνα 5:** Η θέση της μελανής οπής Sgr A\* στο κέντρο του Γαλαξία. Φαίνονται λοβοί θερμού αερίου που εκτείνονται σε δεκάδες έτη φωτός στις δύο πλευρές της μελανής οπής [5].



# Η ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ ΔΙΚΟΥ ΜΑΣ ΓΑΛΑΞΙΑ

Πρόσφατες παρατηρήσεις στις ακτίνες-Χ αποκαλύπτουν την ύπαρξη πίδακα και λοβών θερμού αερίου.



Εικόνα 6: Η μελανή οπή Sgr A\* και πίδακας ακτίνων-Χ, μήκους 1.5 έτους φωτός [6].

# Η ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ ΔΙΚΟΥ ΜΑΣ ΓΑΛΑΞΙΑ

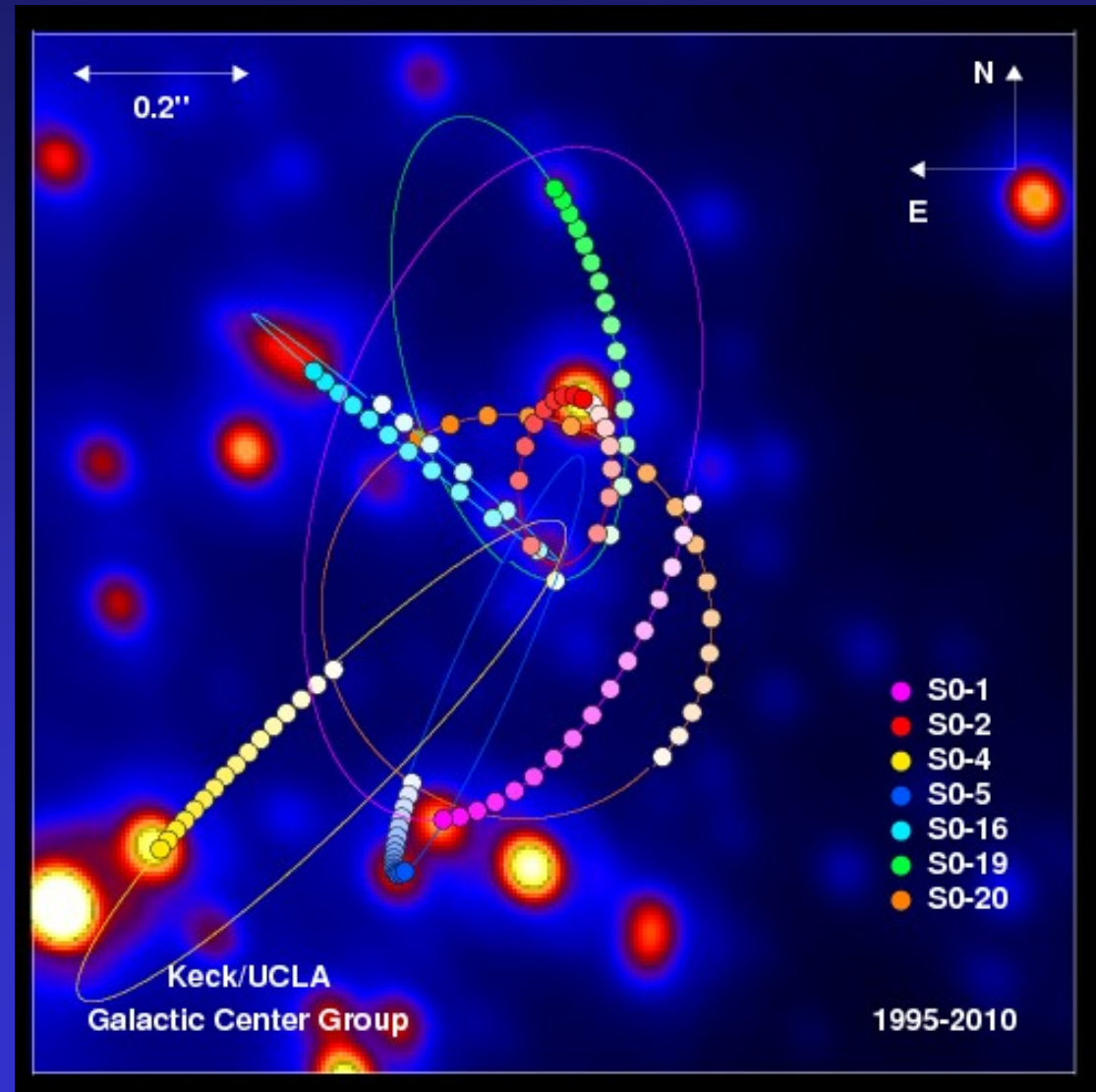


Εικόνα 7: Η μελανή οπή στο κέντρο του Γαλαξία σε ακτίνες - X (αριστερά), και καλλιτεχνική απεικόνιση του κέντρου του Γαλαξία (δεξιά) [7].

# Η ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ ΔΙΚΟΥ ΜΑΣ ΓΑΛΑΞΙΑ

Από μακροχρόνιες παρατηρήσεις της κίνησης των άστρων γύρω από τον Sgr A\* υπολογίστηκε η μάζα της μαύρης τρύπας ίση με 3.7 εκατομμύρια ηλιακές μάζες.

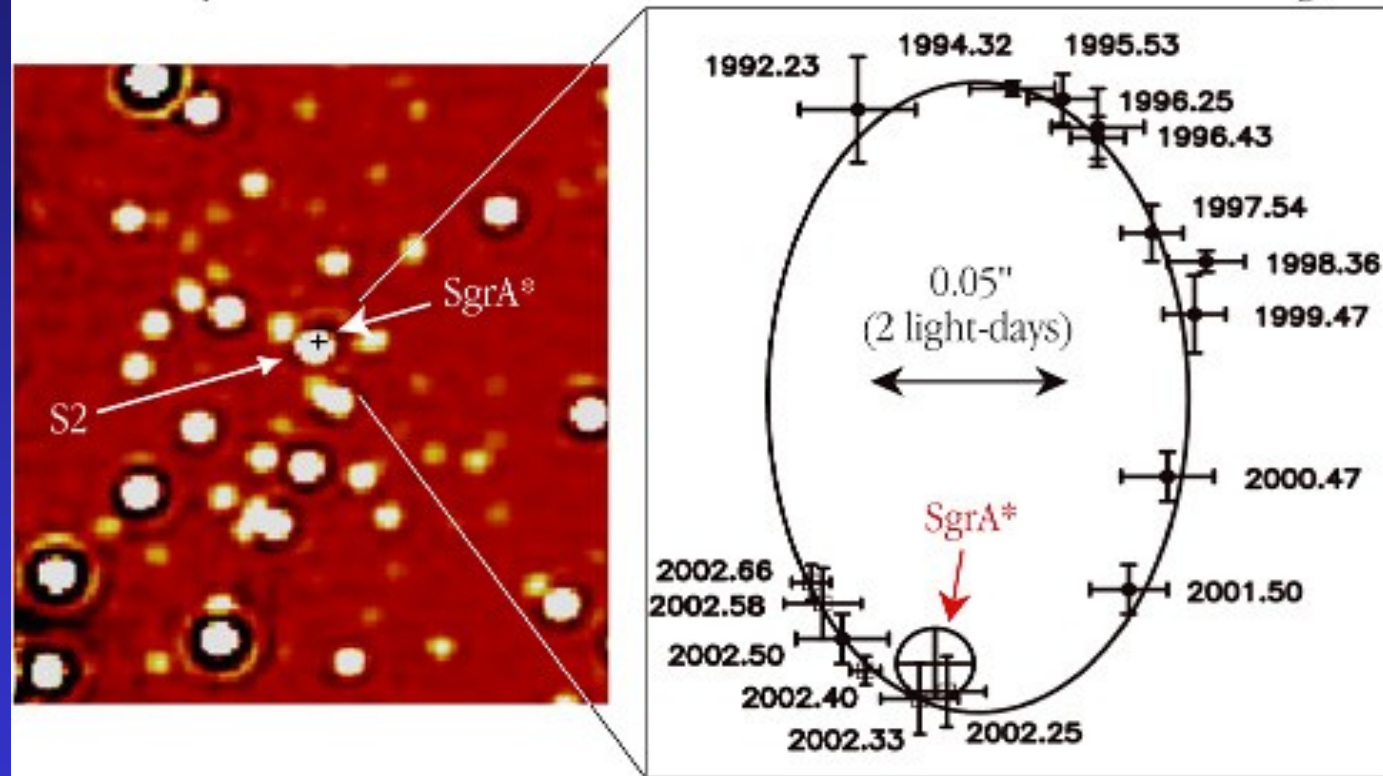
**Εικόνα 8:** Τροχιές αστέρων στην περιοχή των κεντρικών 1.0 x 1.0 δευτέρων λεπτών του τόξου του Γαλαξία [8].



# Η ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ ΔΙΚΟΥ ΜΑΣ ΓΑΛΑΞΙΑ

NACO May 2002

S2 Orbit around SgrA\*



Εικόνα 9: Η τροχιά του αστέρα S2 γύρω από τον SgrA\*. Από αυτές τις παρατηρήσεις φαίνεται ότι μια μελανή οπή υπάρχει στο κέντρο του Γαλαξία [9].

The Motion of a Star around the Central Black Hole in the Milky Way

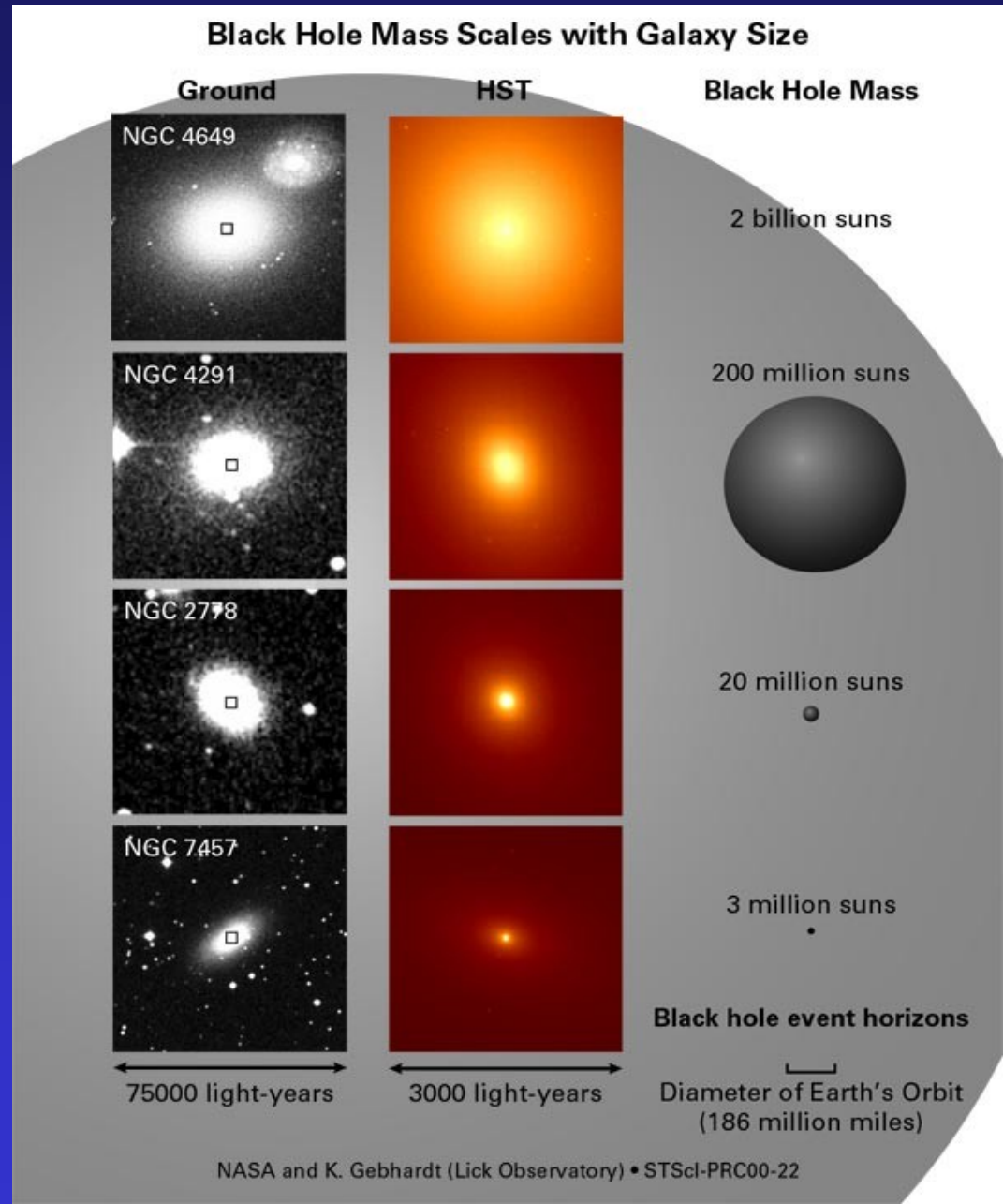


© European Southern Observatory

ESO PR Photo 23c/02 (9 October 2002)

# ΜΑΖΑ ΓΑΛΑΞΙΑΚΗΣ ΜΕΛΑΝΗΣ ΟΠΗΣ

Η μάζα μιας γαλαξιακής μελανής οπής βρέθηκε ότι είναι ανάλογη του μεγέθους του γαλαξία στον οποίο υπάρχει.



**Εικόνα 10:** Σύγκριση τεσσάρων ελλειπτικών γαλαξιών και των μαζών των μελανών οπών τους. Η αριστερή στήλη δείχνει τους Γαλαξίες. Η μεσαία στήλη απεικονίζει την κεντρική τους περιοχή. Στη δεξιά στήλη φαίνονται οι μάζες των μελανών οπών και οι αντίστοιχες διάμετροι των οριζόντων γεγονότων τους [10].

# Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ

*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»

*17<sup>ος</sup> αιώνας* - Γαλιλαίος

*1880* Eötvös - μάζα αδράνειας = βαρυτική μάζα

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

Οι αδρανειακοί παρατηρητές της Νευτώνειας φυσικής, αντικαθίστανται από παρατηρητές που πέφτουν ελεύθερα σε ένα πεδίο βαρύτητας.

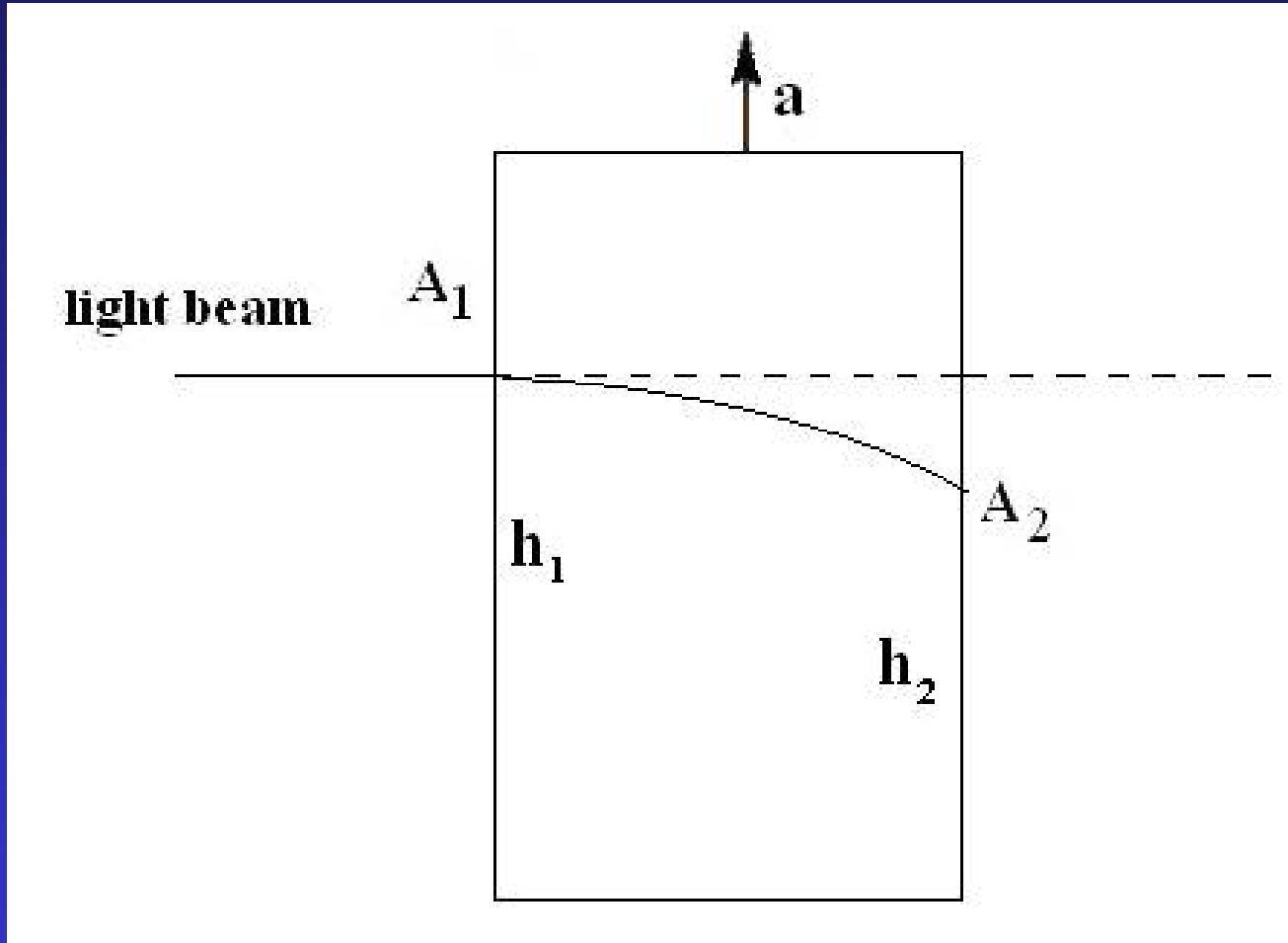
# Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ



Εικόνα 11: Η αρχή της ισοδυναμίας: Η δύναμη αδράνειας που αντιλαμβάνεται παρατηρητής που επιταχύνεται είναι ισοδύναμη με ανάλογη βαρυτική δύναμη [11].



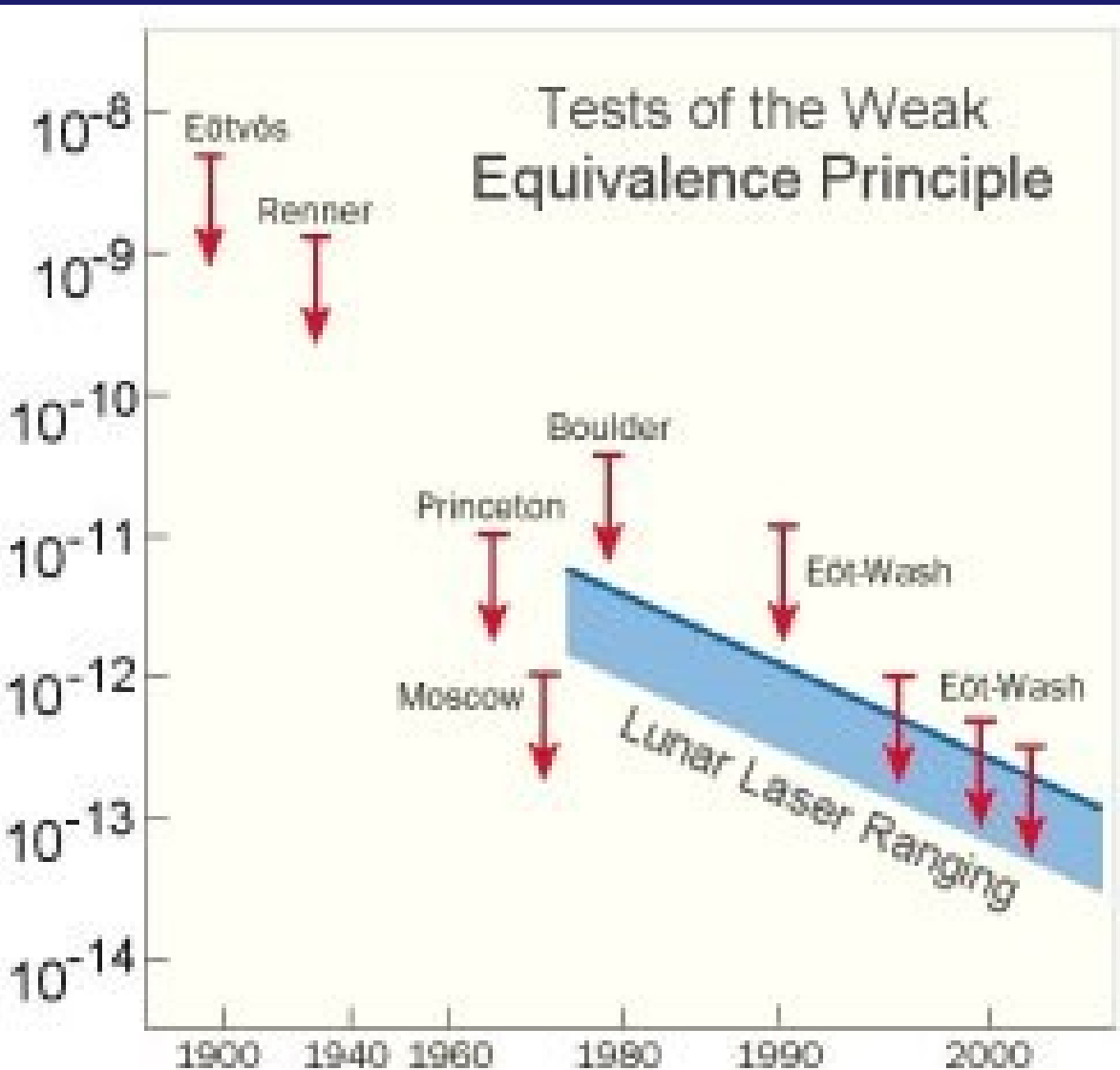
# ΚΑΜΠΥΛΩΣΗ ΤΡΟΧΙΑΣ ΦΩΤΟΝΙΩΝ



Εικόνα 12: Καμπύλωση της τροχιάς φωτονίων σε επιταχυνόμενο σύστημα. Σύμφωνα με την αρχή της ισοδυναμίας, ένα (ισοδύναμο) βαρυτικό πεδίο πρέπει επίσης να προκαλεί καμπύλωση της τροχιάς φωτονίων.

# Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ

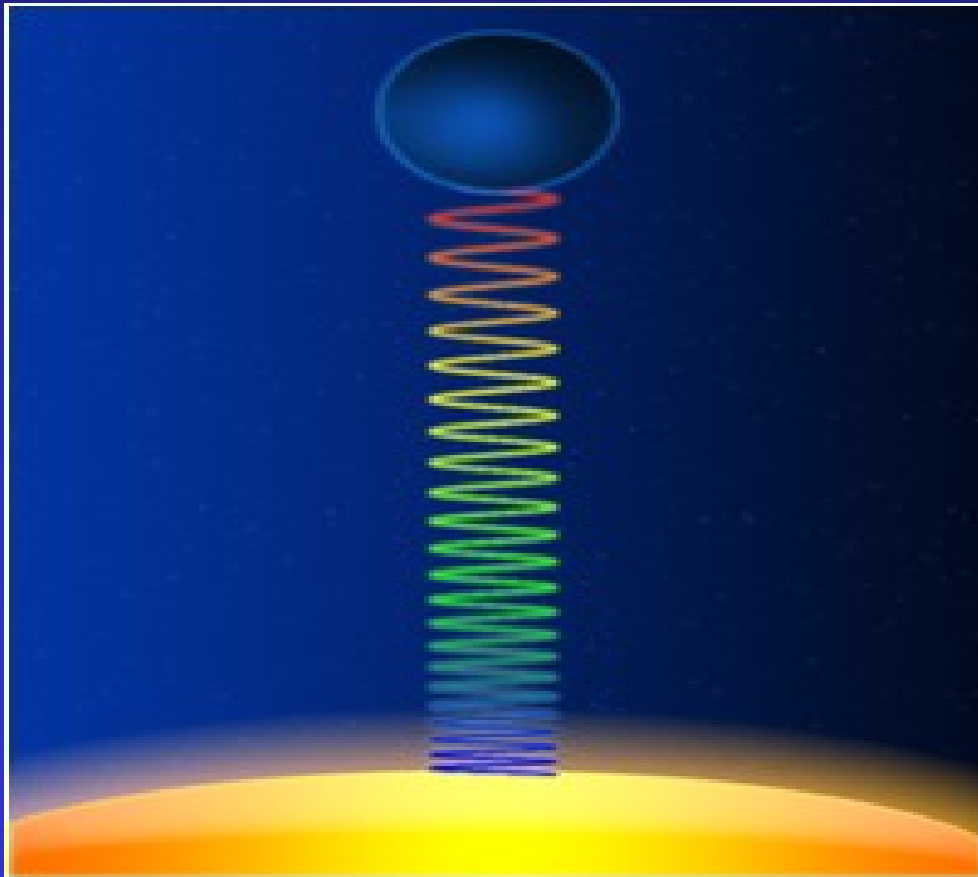
Πειραματικός έλεγχος:



Εικόνα 13: Μετρήσεις της σχετικής διαφοράς της βαρυτικής επιτάχυνσης σε σώματα διαφορετικής μάζας, από το 1900 μέχρι τις αρχές του 21ου αιώνα [13].

# ΕΛΑΤΤΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΦΩΤΟΝΙΩΝ

*1907* Με βάση την αρχή της ισοδυναμίας ο Einstein εξήγαγε τόσο την καμπύλωση του φωτός όσο και την ελάττωση της ενέργειας των φωτονίων καθώς εξέρχονται από ένα βαρυτικό πεδίο.

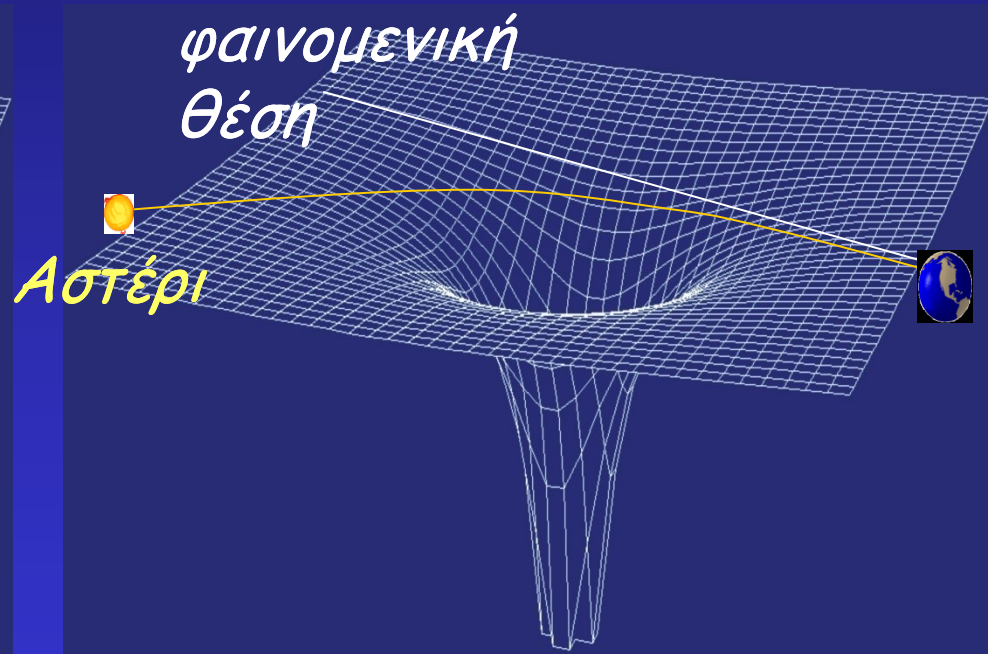
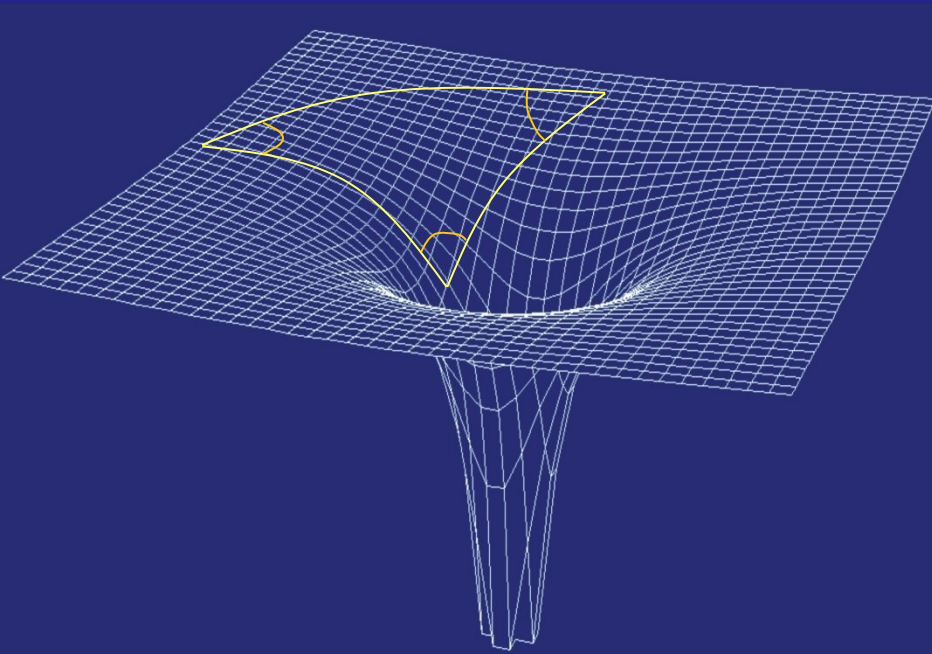


Εικόνα 14: Μετάθεση του μήκους κύματος προς το ερυθρό, κατά την έξοδο φωτονίου από βαρυτικό πεδίο (καλλιτεχνική απεικόνιση) [14].

# Η ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η έννοια της βαρύτητας αντικαθίσταται από την έννοια ενός **καμπυλομένου χωρόχρονου**, στον οποίο το φως ακολουθεί τροχιά με βάση την αρχή της ελάχιστης δράσης.

**Κάθε μορφή ενέργειας** καμπυλώνει το χωρόχρονο.



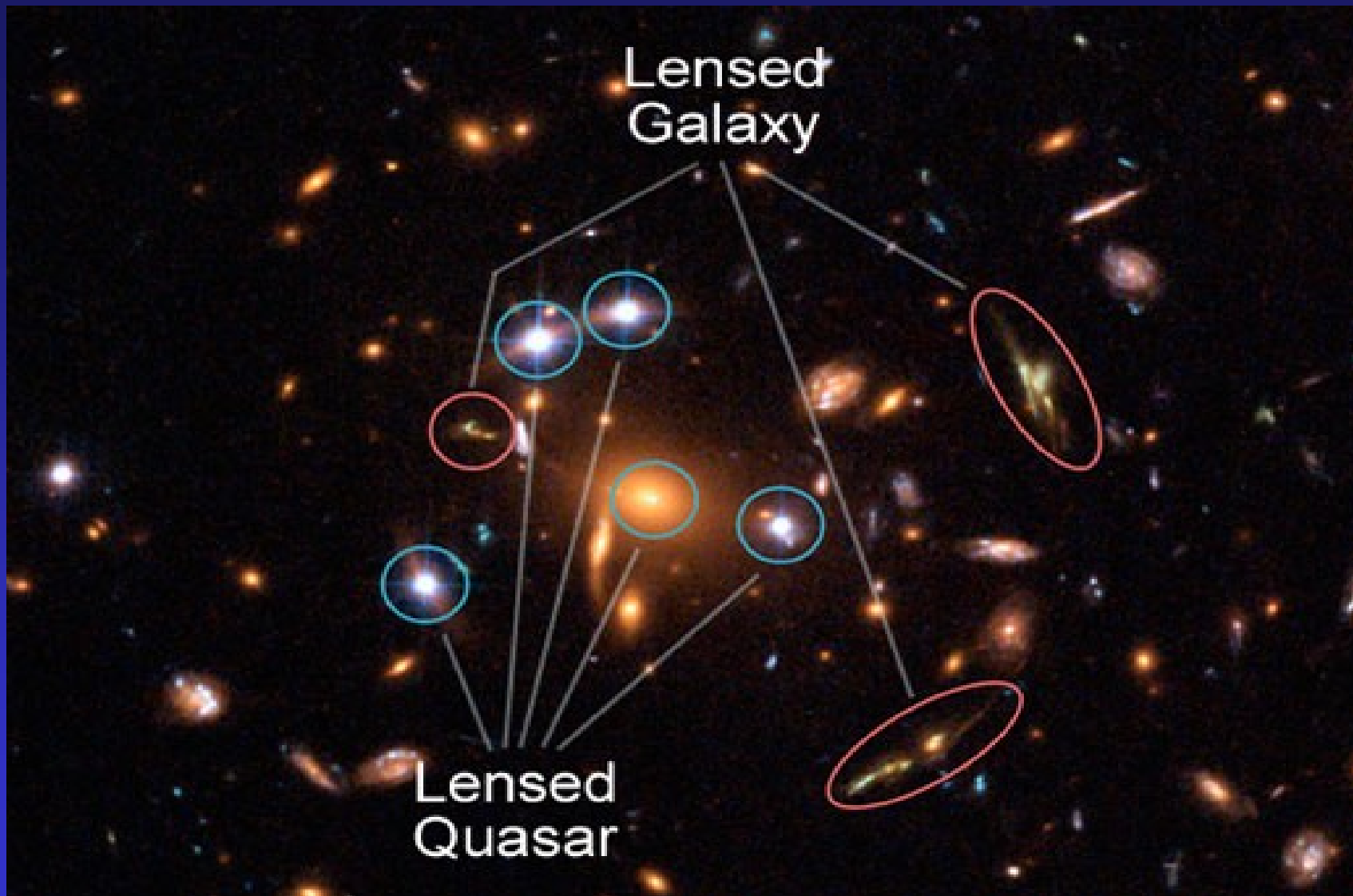
**Εικόνα 15:** Η πραγματική θέση ενός αστέρα, σε αντίθεση με τη φαινομενική του, λόγω καμπύλωσης του φωτός.

# ΒΑΡΥΤΙΚΟΙ ΦΑΚΟΙ



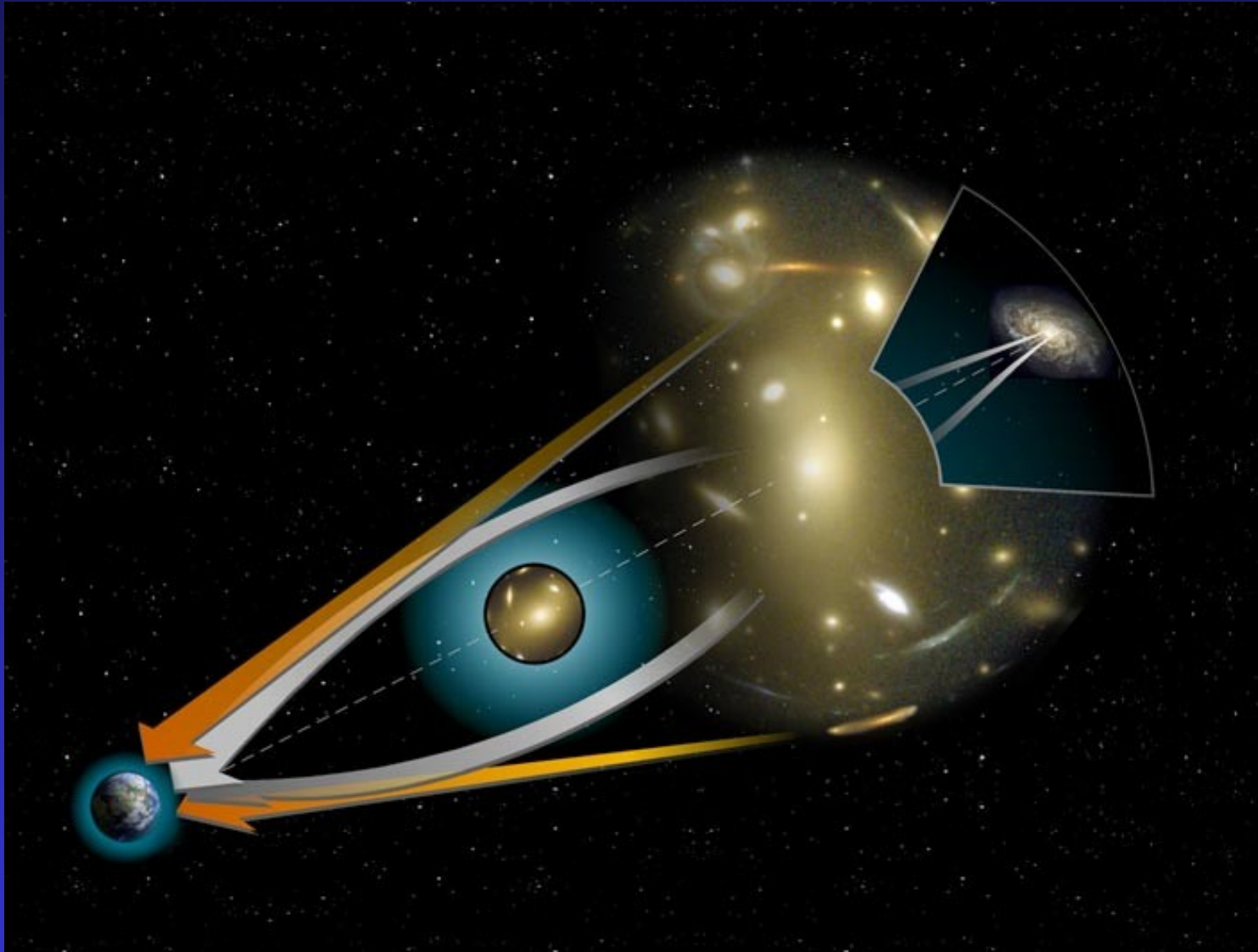
**Εικόνα 16:** Εικόνα από το τηλεσκόπιο Hubble, στην οποία φαίνεται η δημιουργία πέντε ειδώλων ενός μακρινού Quasar, από το σμήνος γαλαξιών SDSS J1004+4112, μέσω βαρυτικής καμπύλωσης του φωτός [16].

# ΒΑΡΥΤΙΚΟΙ ΦΑΚΟΙ



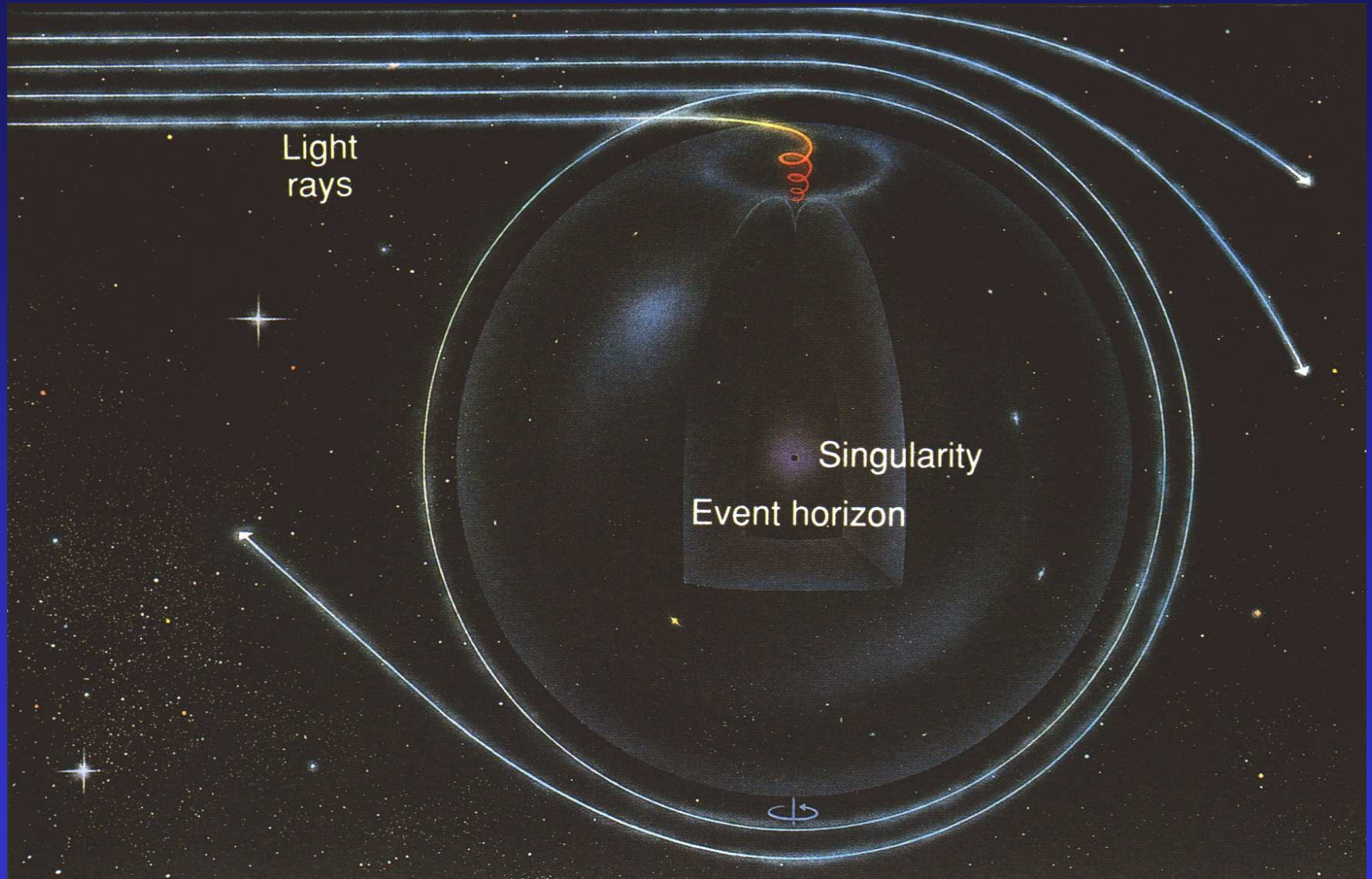
Εικόνα 17: Τα πέντε είδωλα του Quasar, καθώς και στρεβλωμένες εικόνες άλλων γαλαξιών, λόγω καμπύλωσης του φωτός από το ίδιο σμήνος γαλαξιών [17].

# ΒΑΡΥΤΙΚΟΙ ΦΑΚΟΙ



Εικόνα 18: Φως από μακρινό γαλαξία παραμορφώνεται και καμπυλώνεται λόγω βαρύτητας, κατά το πέρασμά του κοντά από σμήνος Γαλαξιών [18].

# ΦΩΤΟΝΙΑ ΚΟΝΤΑ ΣΕ Μ.Ο.



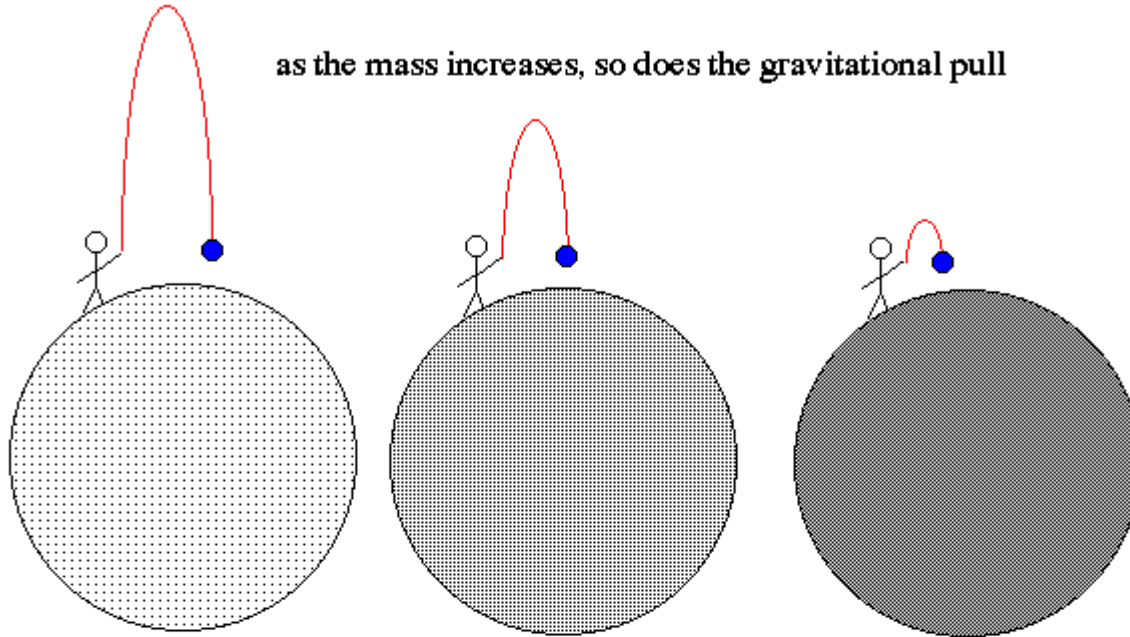
**Εικόνα 19:** Τροχιές φωτονίων για διέλευση κοντά σε μελανή οπή. Φωτόνια με μικρή παράμετρο κρούσης παγιδεύονται εντός του ορίζοντα γεγονότων της μελανής οπής [19].



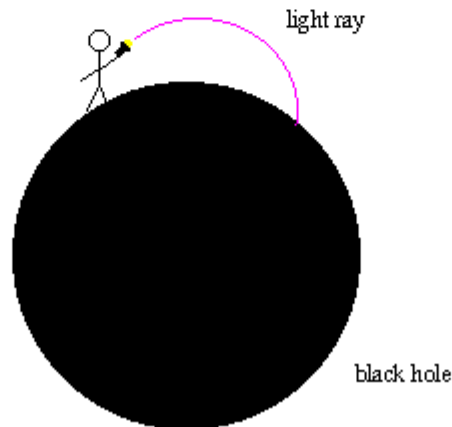
# ΜΕΛΑΝΕΣ ΟΤΤΕΣ

## Black Hole

as the mass increases, so does the gravitational pull

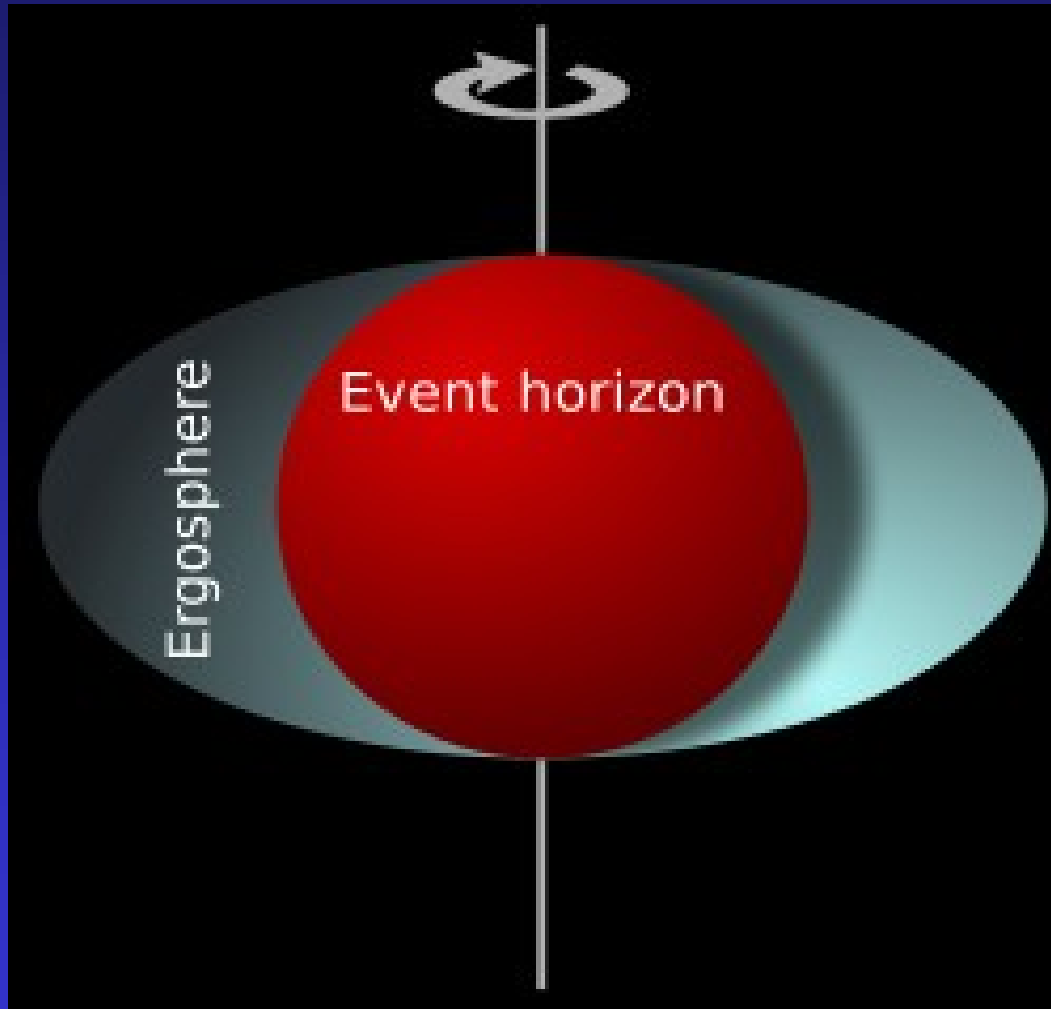


if the gravitational pull is such that even light cannot escape, then a black hole forms



Εικόνα 20: Το Νευτώνειο ανάλογο της έννοιας της μελανής οπής (J. Michell, 1783) [20].

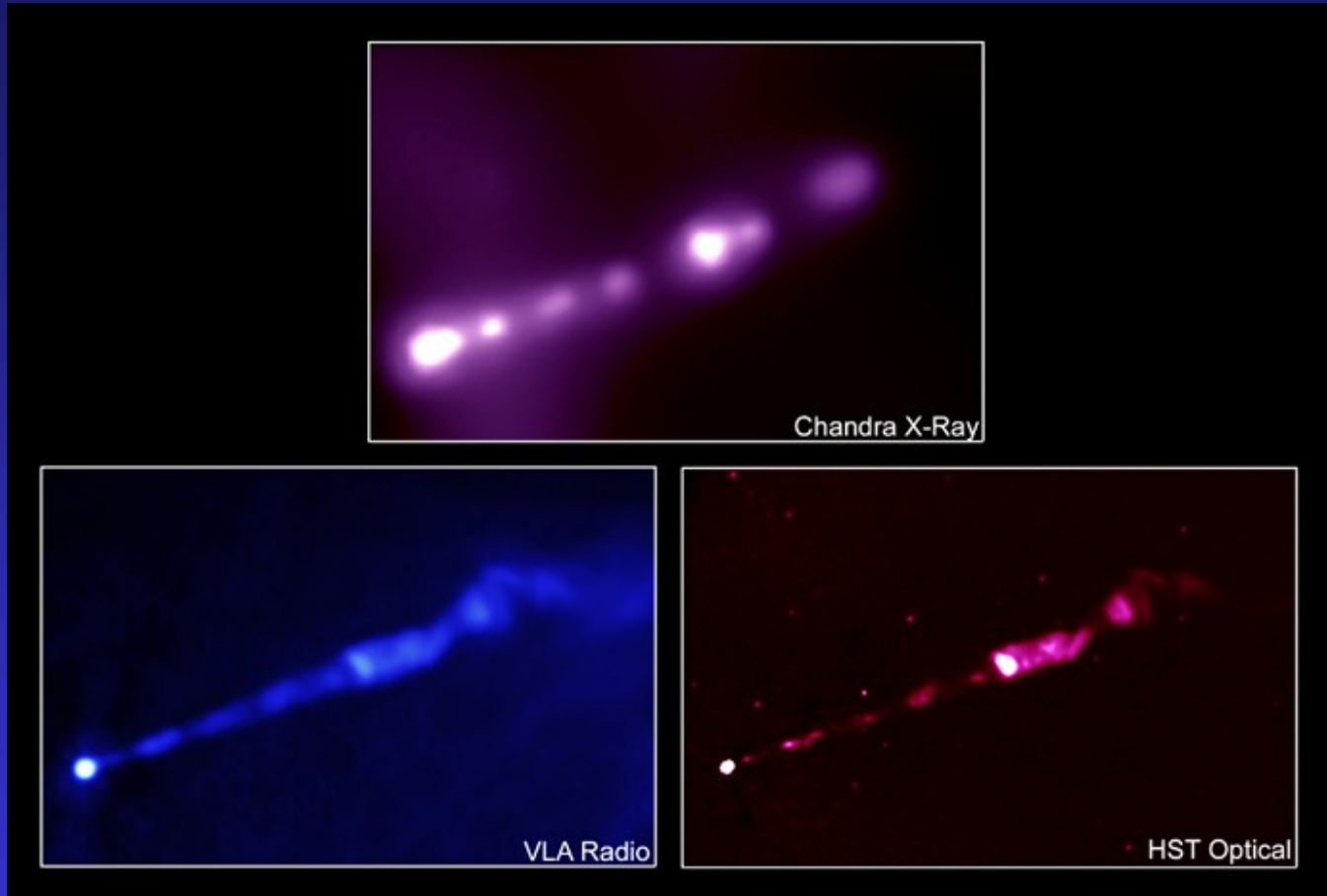
# ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗ Μ.Ο. KERR ΟΡΙΖΟΝΤΑΣ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ



**Εικόνα 21:** Ορίζοντας γεγονότων και εργόσφαιρα μελανής οπής. Εντός της εργόσφαιρας, ένα σώμα εξαναγκάζεται σε περιστροφή [21].

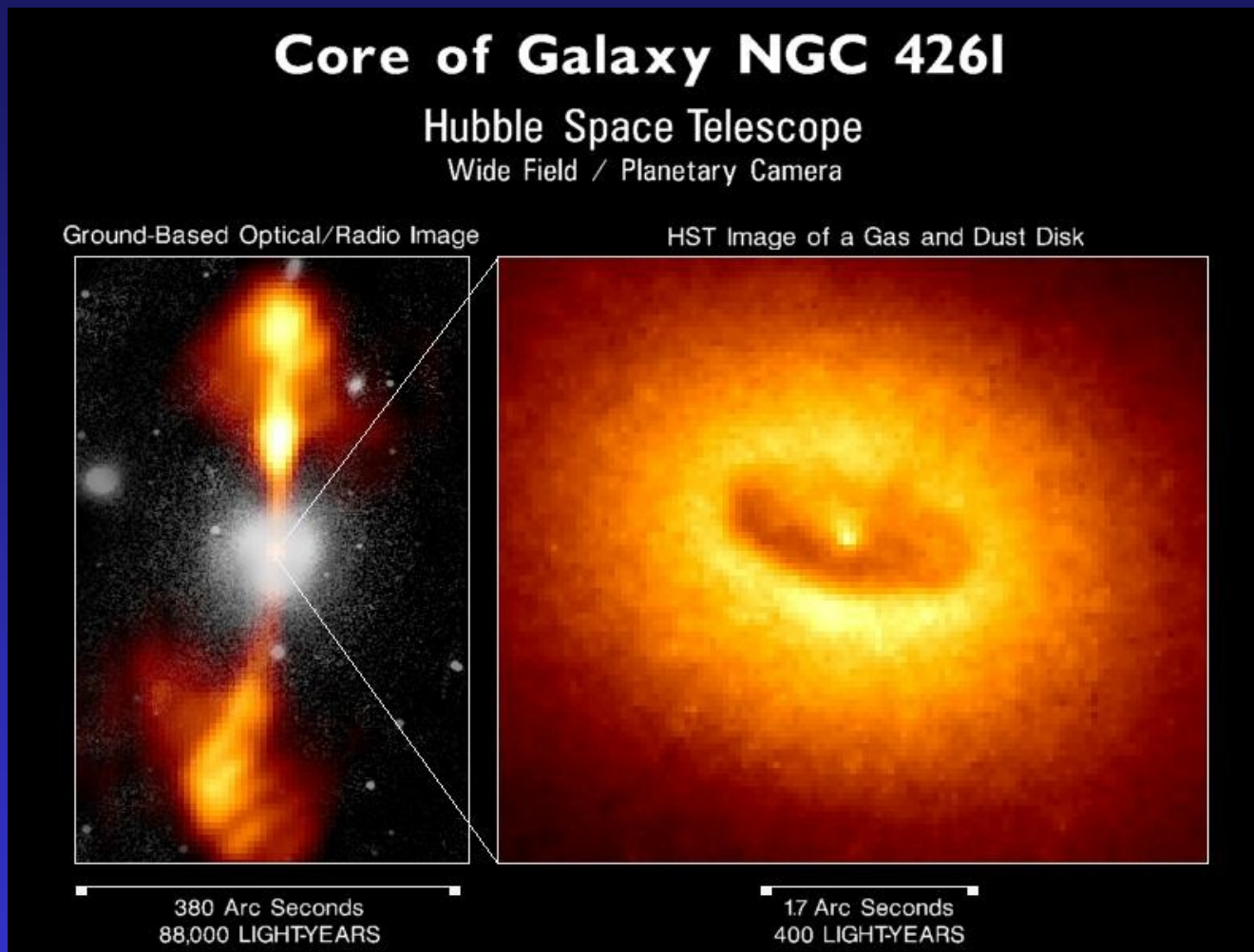
# ΠΙΔΑΚΑΣ ΤΗΣ ΓΑΛΑΞΙΑΚΗΣ ΜΕΛΑΝΗΣ ΟΠΗΣ Μ87

## Κόμβοι: Ακτινοβολία Synchrotron



**Εικόνα 22:** Πίδακας από τη γαλαξιακή μελανή οπή M87, σε ακτίνες-Χ, ραδιοκύματα και οπτικό. Φαίνεται η μη-ομαλή μορφή του πίδακα, που σχηματίζει κόμβους. Οι κόμβοι προέρχονται από ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας στους πίδακες, που κινούνται γύρω από τις μαγνητικές γραμμές και ακτινοβολούν λόγω της επιτάχυνσης τους [22].

# ΓΑΛΑΞΙΑΚΗ ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ NGC 4261

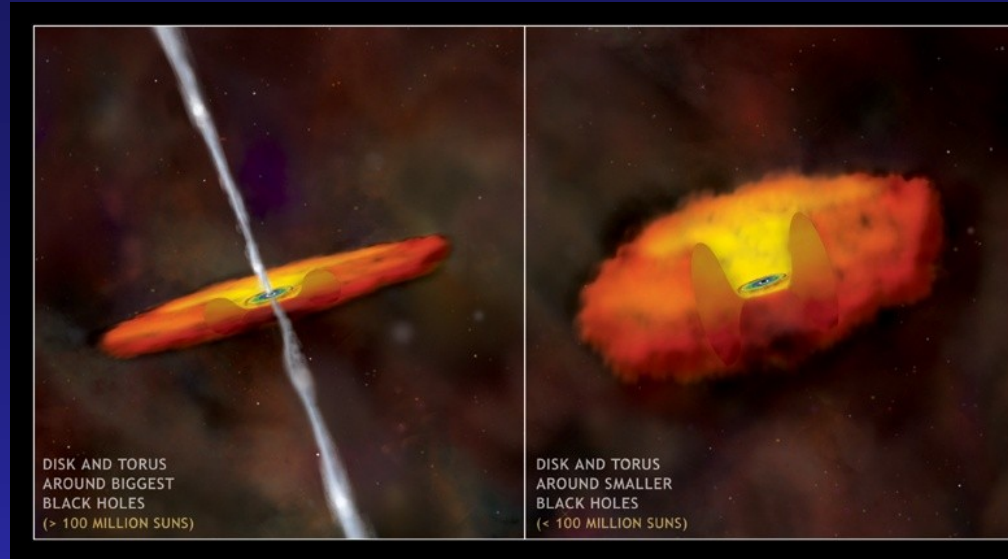


**Εικόνα 23:** Αριστερά: Εικόνα του γαλαξία NGC 4261 από επίγειο τηλεσκόπιο στο οπτικό (λευκό) και στα ραδιοκύματα (πορτοκαλί), όπου και φαινονται οι πίδακες, μήκους 88.000 ετών φωτός. Δεξιά: Εικόνα από το Hubble Space Telescope αποκαλύπτει δίσκο αερίου και σκόνης που πιθανότατα τροφοδοτεί μελανή οπή στο κέντρο του γαλαξία [23].

# ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΟΙ ΠΙΔΑΚΕΣ

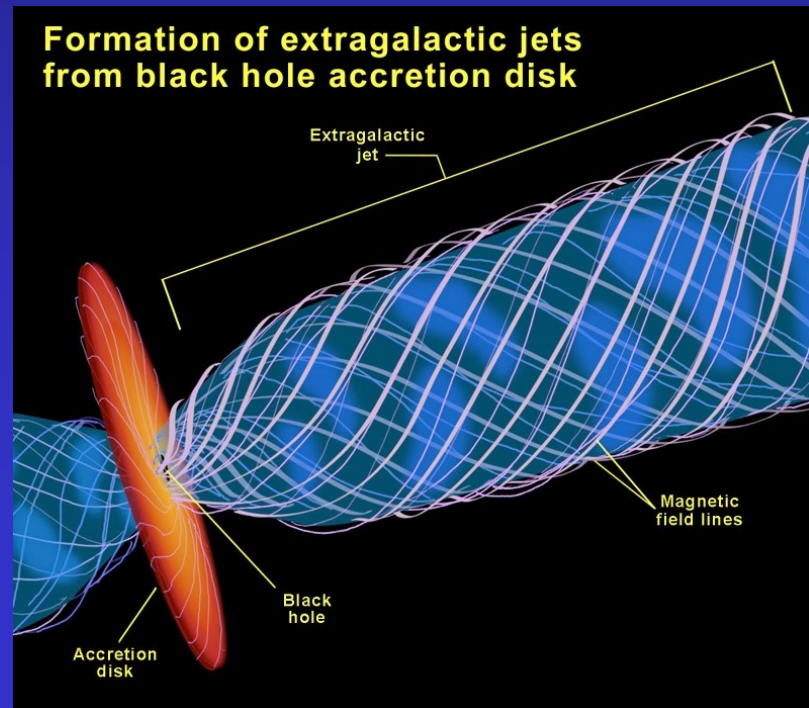
Ισχυρός πίδακας υπάρχει γύρω από τις βαρύτερες μελανές οπές.

**Εικόνα 24:** Πίδακας σε μεγάλη μελανή οπή (αριστερά) [24].



Ο πίδακας σταθεροποιείται από μαγνητικά πεδία.

**Εικόνα 25:** Καλλιτεχνική αναπαράσταση των μαγνητικών πεδίων του πίδακα μελανής οπής [25].



# ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

1. Accretion Disks  
James Schombert, Astronomy 122 Lecture Notes  
University of Oregon  
<http://abyss.uoregon.edu/~js/ast122/lectures/lec19.html>
2. New Evidence for Black Holes  
NASA Science News  
[http://science1.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast12jan\\_1/](http://science1.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast12jan_1/)
3. "Black" Black Holes: Chandra Uncovers New Evidence for Event Horizons Surrounding Black Holes  
Credit: NASA/CXC/M.Weiss  
<http://chandra.harvard.edu/photo/2001/blackholes/index.html>
4. Spectrum of Gas Disc in Active Galaxy M87  
Credit: Holland Ford, Space Telescope Science Institute/Johns Hopkins University; Richard Harms, Applied Research Corp.; Zlatan Tsvetanov, Arthur Davidsen, and Gerard Kriss at Johns Hopkins; Ralph Bohlin and George Hartig at Space Telescope Science Institute; Linda Dressel and Ajay K. Kochhar at Applied Research Corp. in Landover, Md.; and Bruce Margon from the University of Washington in Seattle NASA/ESA  
<http://www.spacetelescope.org/images/opo9423b/>

# ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

5. Chandra Image of Sgr A\* with Labels  
Credit: NASA/CXC/MIT/F.K. Baganoff et al.  
<http://chandra.harvard.edu/photo/2003/0203long/more.html>
6. Chandra Close-up of Sgr A\* & X-ray Jet with Labels  
Credit: NASA/CXC/MIT/F.K. Baganoff et al.  
<http://chandra.harvard.edu/photo/2003/0203long/more.html>
7. Sagittarius A\*: Stars Surprisingly Form in Extreme Environment Around Milky Way's Black Hole  
Credit: X-ray: NASA/CXC/MIT/F.K. Baganoff et al.;  
Illustration: NASA/CXC/M. Weiss  
<http://chandra.harvard.edu/photo/2005/sgra/>
8. The orbits of stars within the central 1.0 X 1.0 arcseconds of our Galaxy  
Credit: Keck/UCLA Galactic Center Group  
*(Image created by Prof. Andrea Ghez and her research team at UCLA and are from data sets obtained with the W. M. Keck Telescopes)*  
<http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/pictures/orbitsOverImage12.shtml>
9. The motion of a star around the Central Black Hole in the Milky Way  
Credit: ESO (European Southern Observatory)  
<http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/C/Centre+Of+The+Milky+Way>

# ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

10. Black Holes Shed Light on Galaxy Formation  
Credit: NASA and Karl Gebhardt (Lick Observatory)  
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2000/22/image/a/>
11. Equivalence Principle,  
ThinkQuest (Copyright - display for educational and noncommercial purposes)  
<http://library.thinkquest.org/04apr/01330/currentphysics/generalrelativity.htm#>
13. Modern Tests of the Equivalence Principle, NASA Science News,  
[http://science1.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2007/18may\\_equivalenceprinciple/](http://science1.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2007/18may_equivalenceprinciple/)
14. Gravitational Redshift,  
Wikimedia Commons (Author Unspecified)  
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gravitational\\_red-shifting.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gravitational_red-shifting.png)
16. Hubble captures a "five-star" rated gravitational lens  
ESA, NASA, Keren Sharon (Tel-Aviv University) and Eran Ofek (CalTech)  
<http://www.spacetelescope.org/images/heic0606a/>
17. Hubble captures a 'five-star' rated gravitational lens  
<http://spacespin.org/article.php?story=hubble-captures-quintuple-quasar>



# ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

18. Gravitational Lens  
Red Orbit Website  
[http://www.redorbit.com/education/reference\\_library/space\\_1/universe/2574698/gravitational\\_lens/](http://www.redorbit.com/education/reference_library/space_1/universe/2574698/gravitational_lens/)
19. Rays of light being effected by a Black Hole  
Newbury Astronomical Society, Absolute Beginners - Black Holes  
<http://naasbeginners.co.uk/AbsoluteBeginners/Blackholes.htm>
20. Schwarzschild radius, "The Physical Universe" lecture notes: Lecture 19,  
Prof. Ann Zabludoff (Instructor), Mr. Alan Aversa (Teaching Assistant)  
The University of Arizona  
<http://atropos.as.arizona.edu/aiz/teaching/nats102/lecture19.html>
21. Ergosphere, Wikimedia Commons  
Author: User MesserWoland  
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license  
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ergosphere.svg>
22. M87 Jet: Chandra Sheds Light on the Knotty Problem of the M87 Jet  
Credit: X-ray: NASA/CXC/MIT/H.Marshall et al. Radio: F. Zhou, F.Owen  
(NRAO), J.Biretta (STScI) Optical: NASA/STScI/UMBC/E.Perlman et al.  
<http://chandra.harvard.edu/photo/2001/0134/>

# ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

23. Dust Disk Fuels Black Hole in Giant Elliptical Galaxy NGC 4261  
Credit: Walter Jaffe/Leiden Observatory, Holland Ford/JHU/STScI, NASA  
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1992/27/image/b/>
24. Illustrations of Disks around Black Holes  
Credit: NASA/CXC/M.Weiss  
<http://chandra.harvard.edu/resources/illustrations/blackholes2.html>
25. Very Long Baseline Array Reveals Formation Region of Giant Cosmic Jet Near a Black Hole  
Credit: NASA, Ann Field (Space Telescope Science Institute)  
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1999/43/image/e/>



# Τέλος Ενότητας

Επεξεργασία: Νικόλαος Τρυφωνίδης

Θεσσαλονίκη, 31 Μαρτίου 2014



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

