



Αστροφυσική

Ενότητα # 9: 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



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.



ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΤΕΡΓΙΟΥΛΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



8/1/2014

Βαρυτικά κύματα

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.

Το βαρυτικό πεδίο στο κενό, δε θα περιγράφεται από μια εξίσωση ελλειπτικού τύπου

$$\nabla^2 \Phi = 0$$

αλλά από μια κυματική εξίσωση (υπερβολικού τύπου)

$$-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \nabla^2 \Phi = 0$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό (εάν θεωρηθεί πως η c είναι άπειρη, προκύπτει η Νευτώνεια βαρύτητα!).



Εικόνα 3:
Henri Poincare [3].

Η αρχή της ισοδυναμίας

6^{ος} αιώνας: Ο Ιωάννης Φιλόππος περιγράφει πως

«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 .

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

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

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

Η αρχή της ισοδυναμίας

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

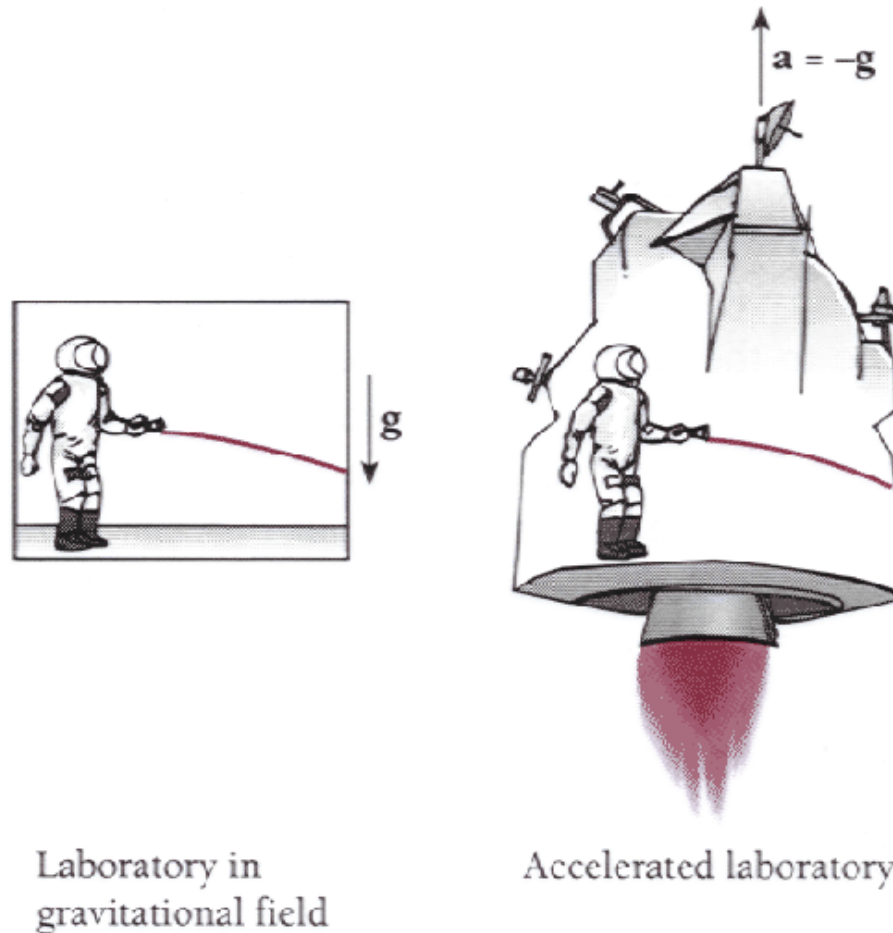
Αντικαθιστά τους αδρανειακούς παρατηρητές της Νευτώνειας θεωρίας, από παρατηρητές που πέφτουν ελεύθερα σε ένα πεδίο βαρύτητας.



Εικόνα 4: Η αρχή της ισοδυναμίας: Η δύναμη αδράνειας που αντιλαμβάνεται παρατηρητής που επιταχύνεται είναι ισοδύναμη με ανάλογη βαρυτική δύναμη [4].

Η καμπύλωση της τροχιάς των φωτονίων

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



Εικόνα 5: Δεξιά, φαίνεται η 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 [5].

Η βαρυτική μετάθεση του μήκους κύματος

1907: Ο Einstein αποδεικνύει με βάση την αρχή της ισοδυναμίας ότι το μήκος κύματος των φωτονίων μετατίθεται προς το ερυθρό (αυξάνει), όταν εξέρχονται από βαρυτικά πεδία.

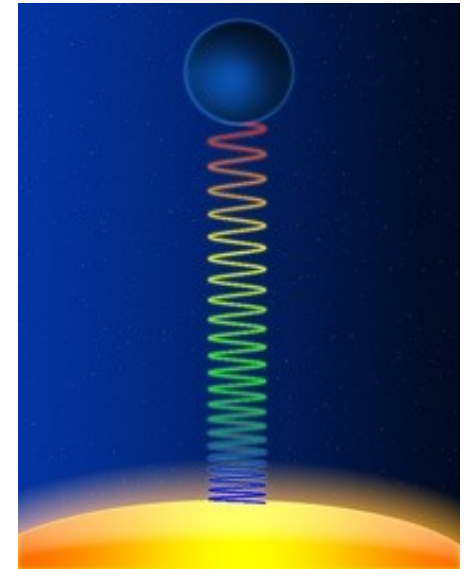
Η κλασική ενέργεια ενός φωτονίου $E = hc / \lambda$ δε διατηρείται, καθώς τα h και c είναι παγκόσμιες σταθερές.

Διατηρείται σταθερή η σχετικιστική ενέργεια

$$E = -u_{\alpha} p^{\alpha}$$

Φωτόνια που εκπέμπονται με μήκος κύματος λ από κάποια απόσταση r στο βαρυτικό πεδίο ενός αστέρα μάζας M , φτάνουν σε μεγάλες αποστάσεις με μήκος κύματος:

$$\lambda_{\infty} = \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-1/2} \lambda$$



Εικόνα 6: Μετάθεση του μήκους κύματος προς το ερυθρό, κατά την έξοδο φωτονίου από βαρυτικό πεδίο [6].

Καμπύλωση του χωροχρόνου

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

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 μετρικός τανυστής

Η ΓΘΣ χρησιμοποιεί ως κύριο μαθηματικό εργαλείο έναν *συμμετρικό πίνακα διαστάσεων 4x4*, τον *μετρικό τανυστή*

$$g_{ij} = \begin{bmatrix} g_{tt} & g_{tx} & g_{ty} & g_{tz} \\ g_{xt} & g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{yt} & g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{zt} & g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} \end{bmatrix}$$

Για παράδειγμα, ο *ίδιος χρόνος* $d\tau$ ενός παρατηρητή, δίνεται από τη σχέση

$$d\tau^2 = -\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 g_{ij} dx^i dx^j$$

Ο χώρος και ο χρόνος σχηματίζουν ένα 4-διάστατο *χωροχρόνο*.

Οι εξισώσεις πεδίου της ΓΘΣ

Η εξίσωση Poisson της Νευτώνειας θεωρίας (που προβλέπει ακαριαία δράση από απόσταση)

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

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 σταθερά της βαρύτητας G και η ταχύτητα του φωτός στο κενό c θεωρούνται παγκόσμιες σταθερές.

Η αρχή της ελάχιστης δράσης

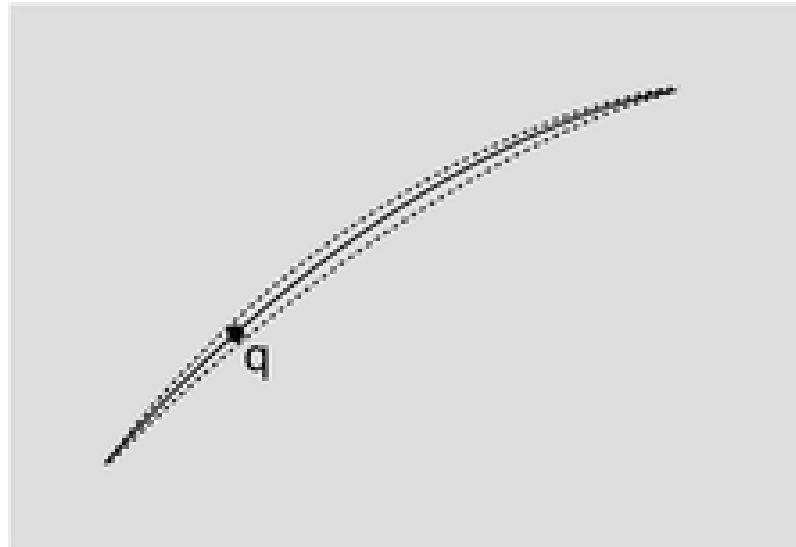
1^{ος} αιώνας π.Χ.: Ο Ήρων ο Αλεξανδρινός παρατηρεί πως:

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



Εικόνα 7: Ήρων ο Αλεξανδρινός [7].

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.

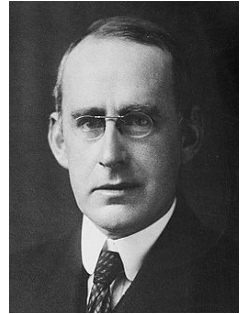


Η καμπύλωση του φωτός

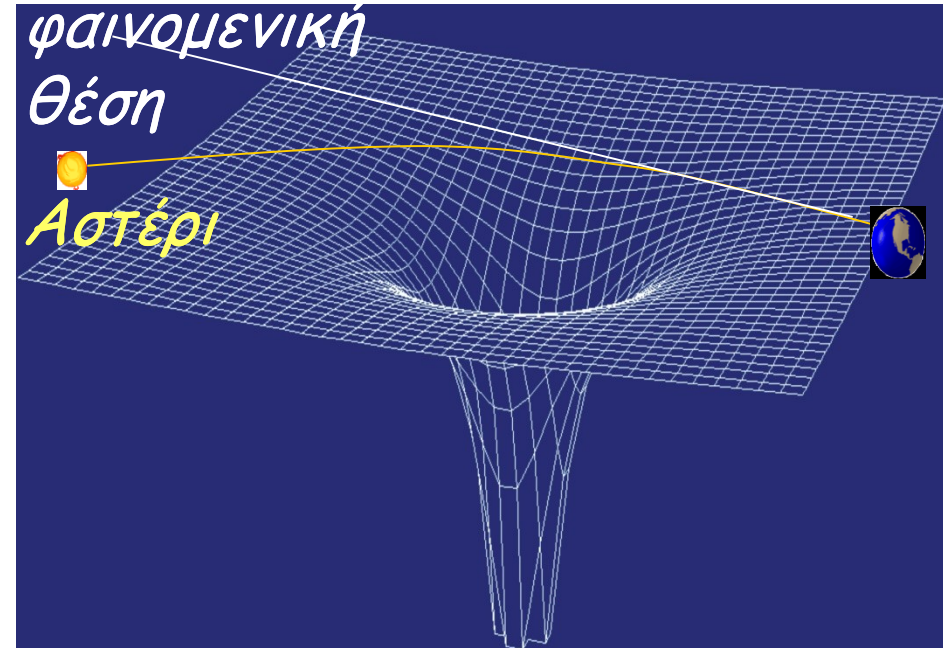
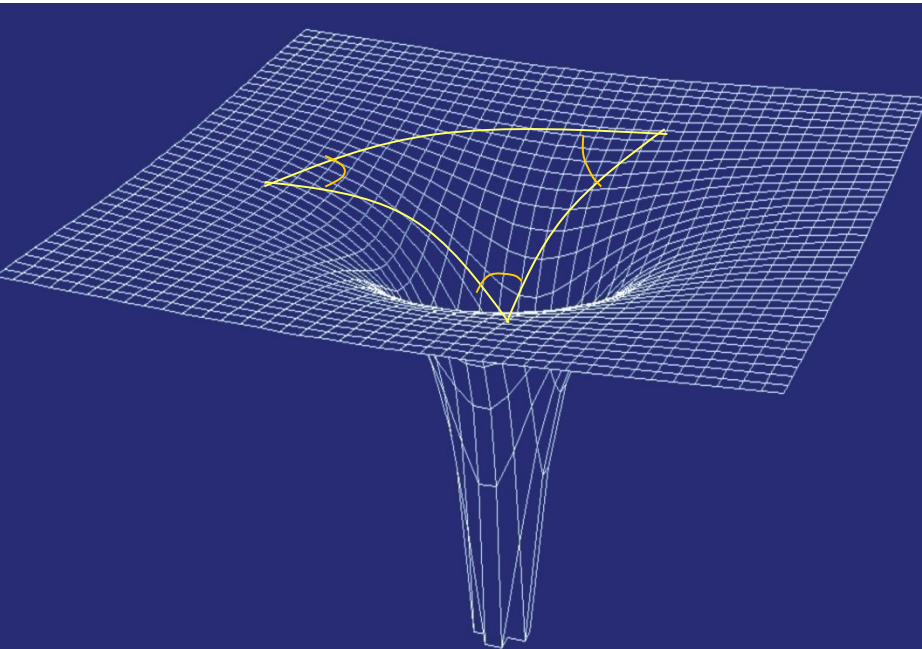
Η ΓΘΣ προβλέπει την **απόκλιση της φαινομενικής θέσης** των αστέρων από την πραγματική τους θέση, λόγω της καμπύλωσης της τροχιάς των φωτονίων από βαρυτικά πεδία.

$$\Delta\theta = \frac{4GM}{bc^2}$$

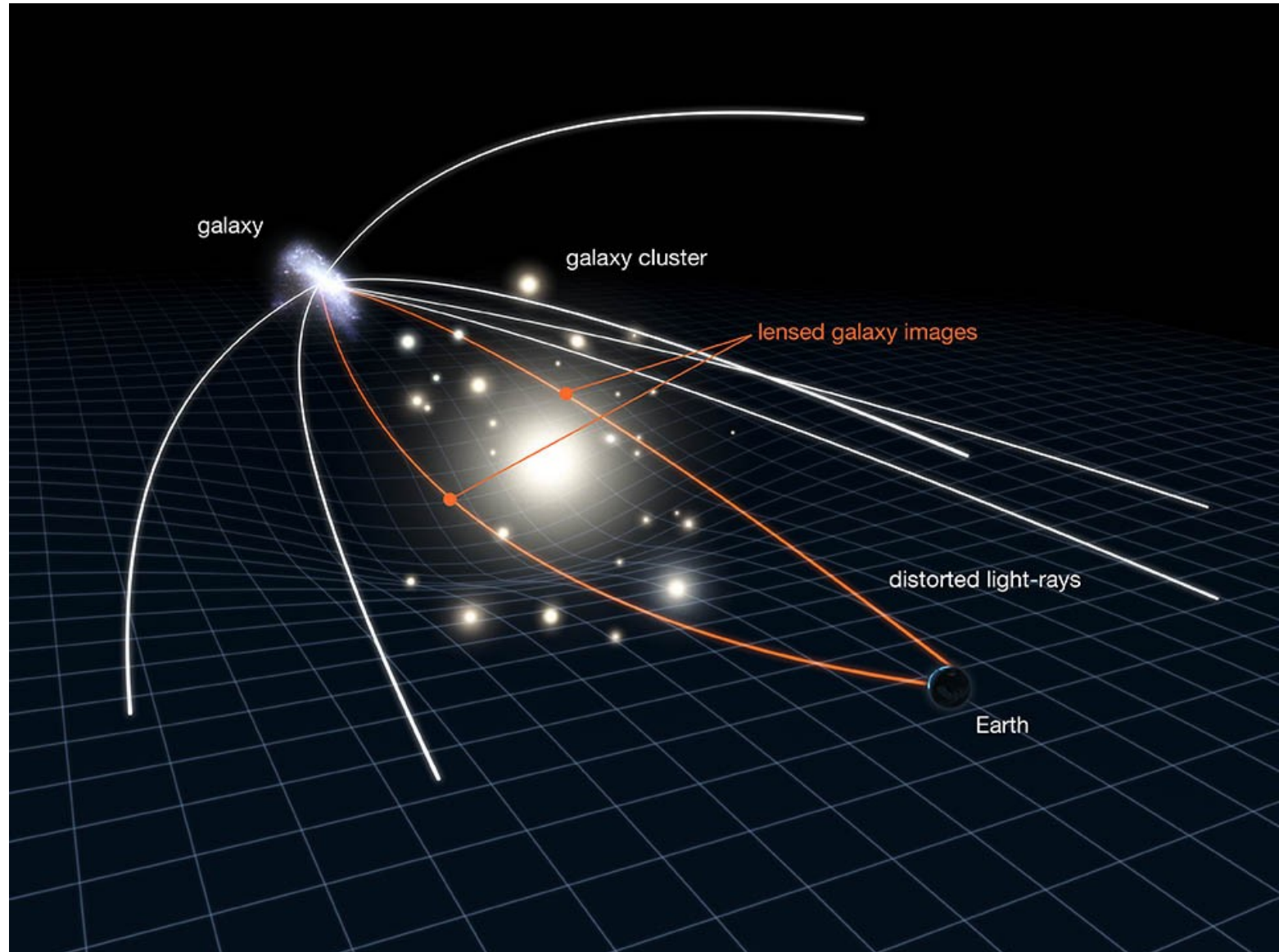
1919: ο **Eddington** παρατήρησε αυτή την απόκλιση κατά τη διάρκεια μιας ολικής έκλειψης του Ήλιου.



Εικόνα 8:
Arthur Eddington
[8].

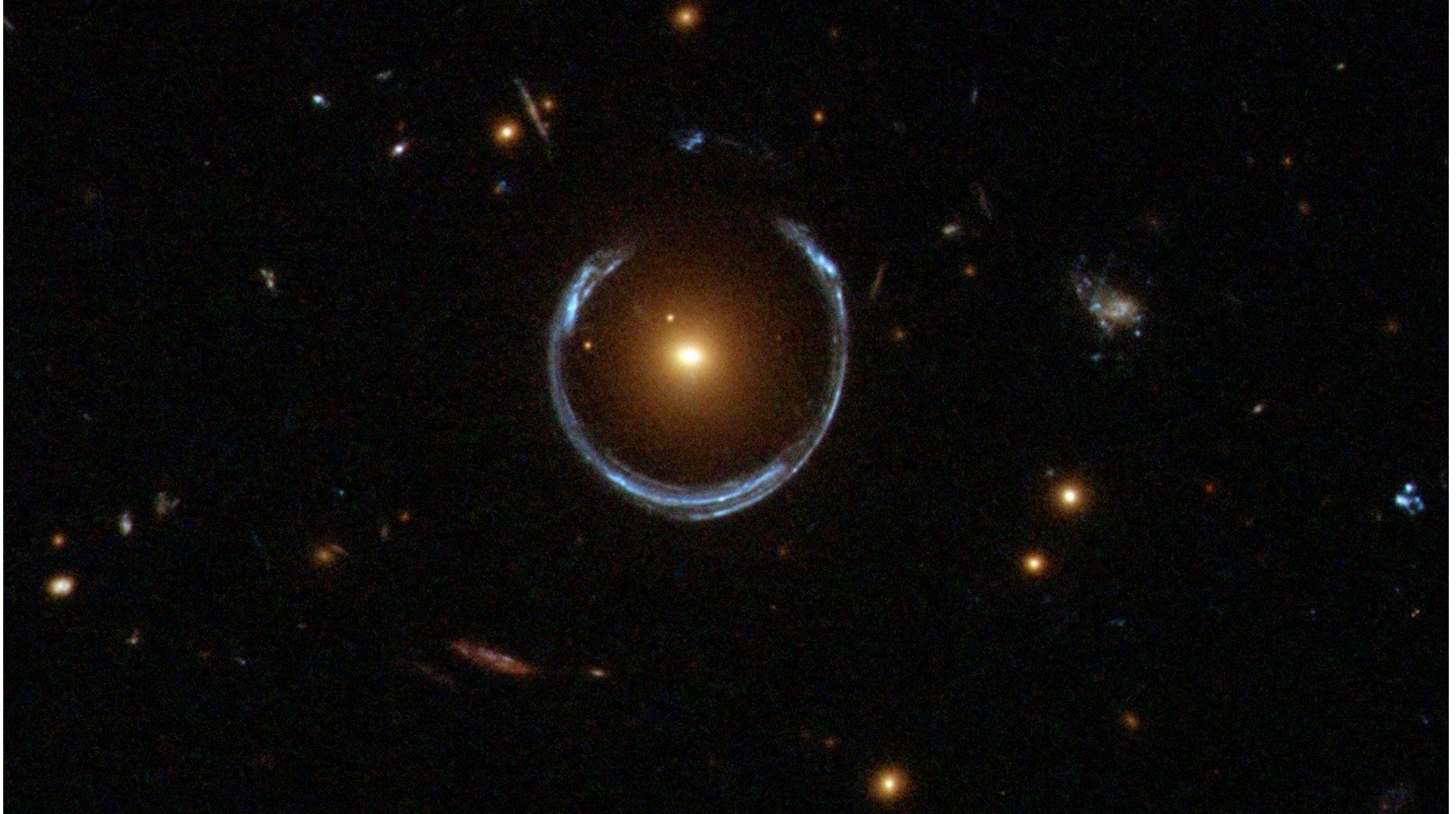


Βαρυτικοί φακοί



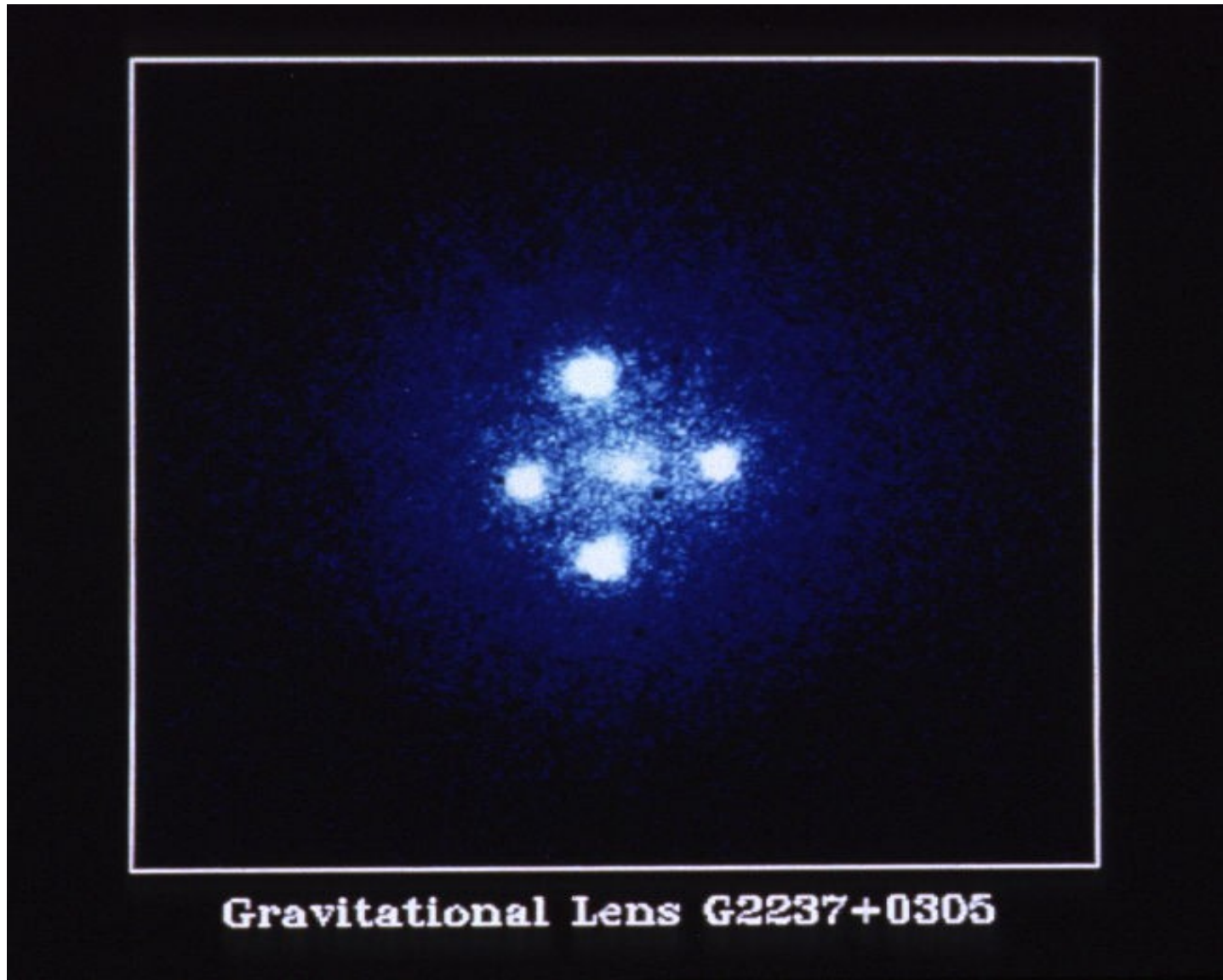
Εικόνα 9: Σμήνος γαλαξιών καμπυλώνει το φως μακρινού γαλαξία, προκαλώντας παραμόρφωση της εικόνας του γαλαξία και πολλαπλά είδωλα [9].

"Δαχτυλίδι του Einstein" LRG 3-757



Εικόνα 10: Η βαρύτητα λαμπρού ερυθρού γαλαξία στρεβλώνει το φως κυανού γαλαξία που βρίσκεται σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση [10].

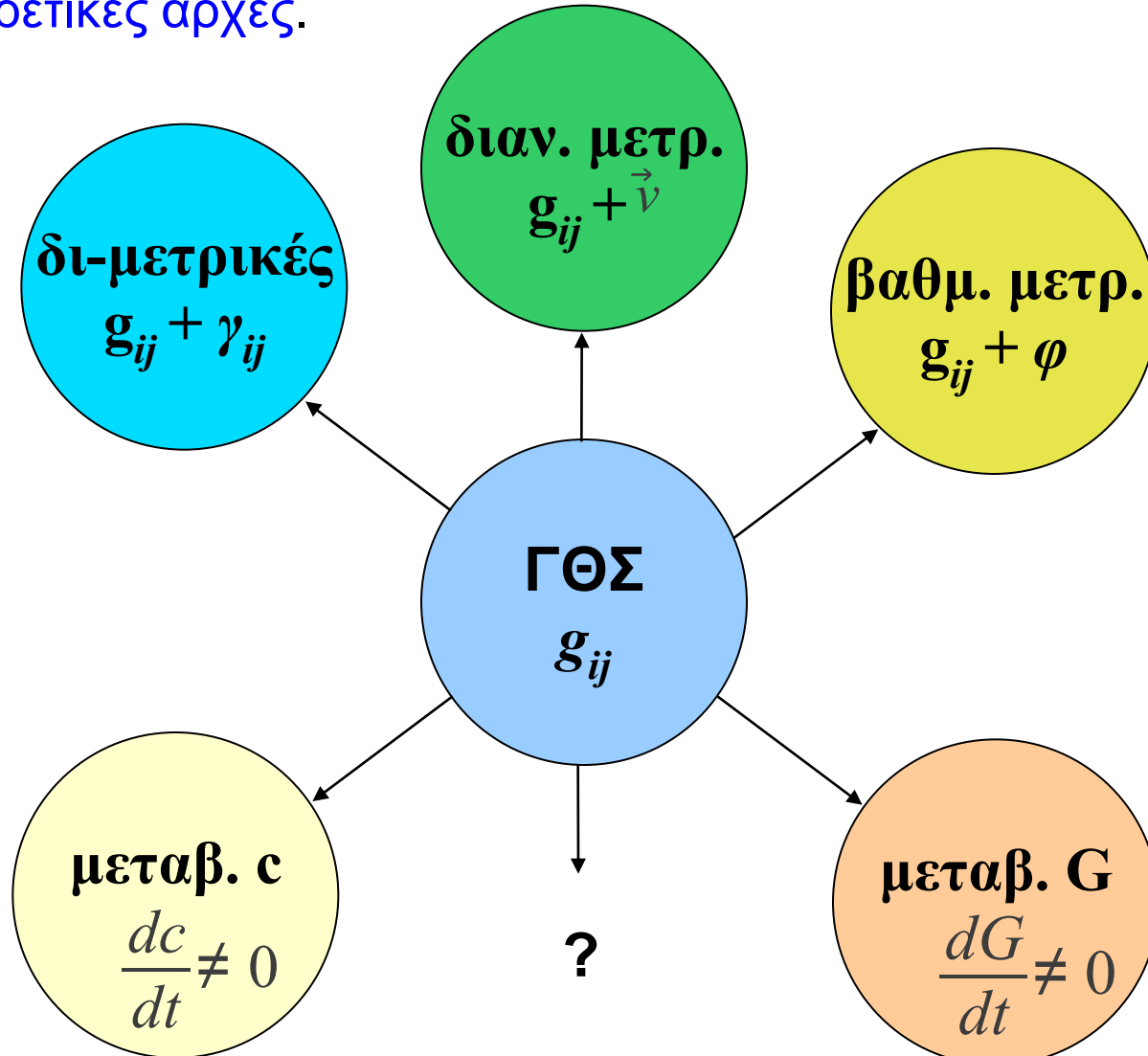
"Σταυρός του Einstein" Q2237+030



Εικόνα 11: Γαλαξίας λειτουργεί ως βαρυτικός φακός, καμπυλώνοντας το φως μακρινού Quasar, το οποίο εμφανίζεται ως τέσσερα είδωλα [11].

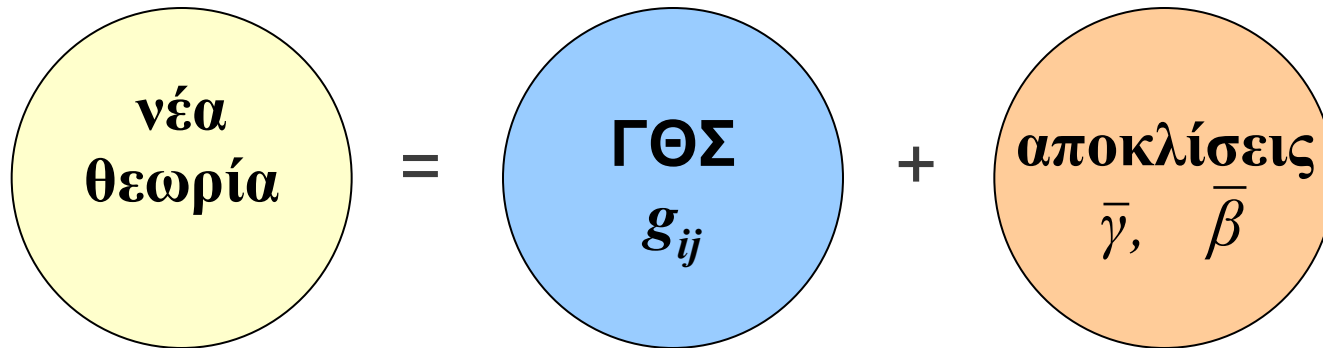
ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ της ΓΘΣ

Σήμερα υπάρχουν επεκτάσεις της ΓΘΣ, που χρησιμοποιούν διαφορετικές αρχές.



Επεκτάσεις της ΓΘΣ

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

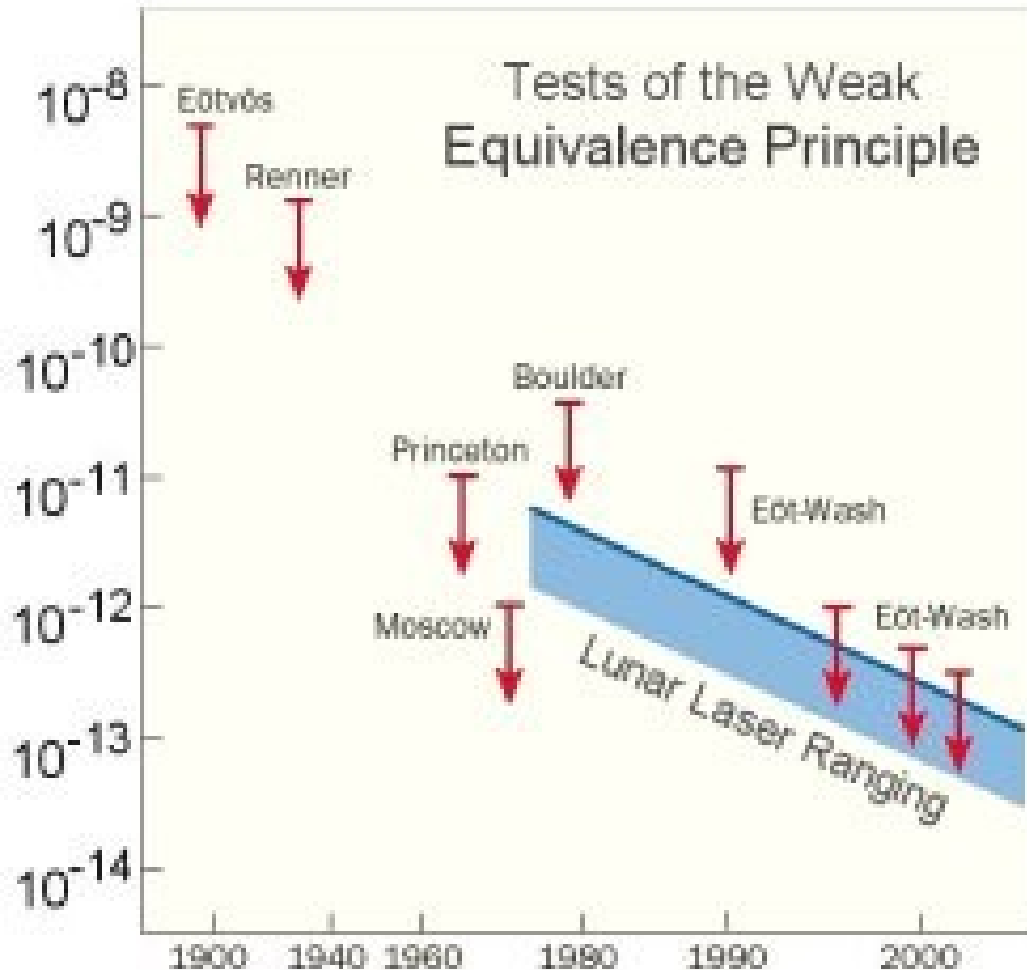


Οι δύο κύριες παράμετροι απόκλισης από τη ΓΘΣ είναι οι $\bar{\gamma}$, $\bar{\beta}$.

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

Έλεγχος της Αρχής της Ισοδυναμίας

Σε εργαστηριακά πειράματα ελέγχεται η διαφορά στην επιτάχυνση που αποκτούν μικρά σώματα από Βηρρύλιο (^9Be) σε σύγκριση με όμοια σώματα από Τιτάνιο (^{48}Ti).



Εικόνα 12: Μετρήσεις της σχετικής διαφοράς της βαρυτικής επιτάχυνσης σε σώματα διαφορετικής μάζας, από το 1900 μέχρι τις αρχές του 21^{ου} αιώνα [12].

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.



Εικόνα 13: Ανακλαστήρας στην επιφάνεια της Σελήνης [13].

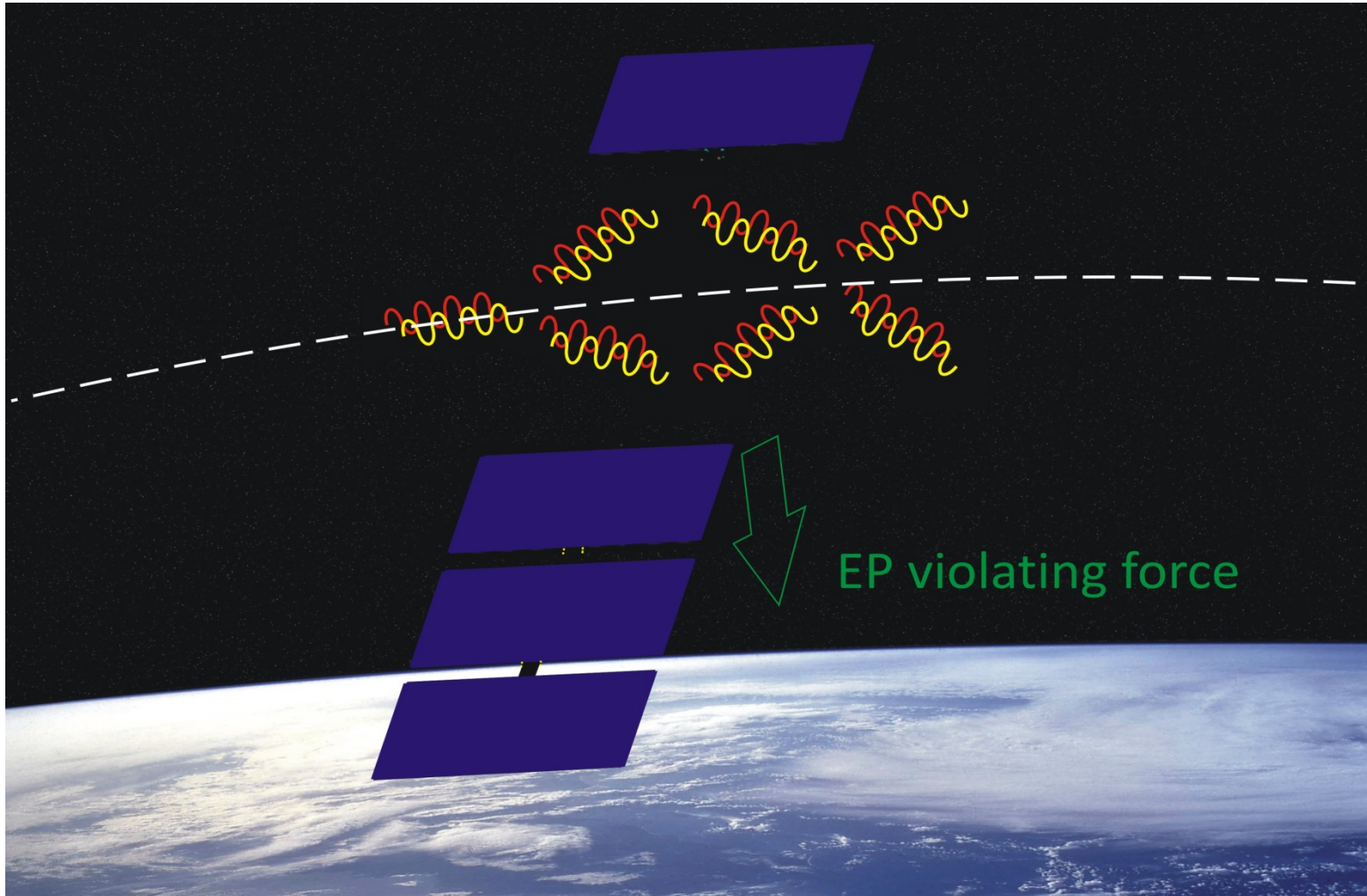


Εικόνα 14: Lunar Laser Ranging στο αστροσκοπείο McDonald [14].

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

Έλεγχος της Αρχής της Ισοδυναμίας

Σε μελλοντικά πειράματα στο διάστημα αναμένεται να αυξηθεί η ακρίβεια κατά πολλές τάξεις μεγέθους.



Εικόνα 15: Έλεγχος της αρχής της ισοδυναμίας με χρήση ατομικής συμβολομετρίας [15]

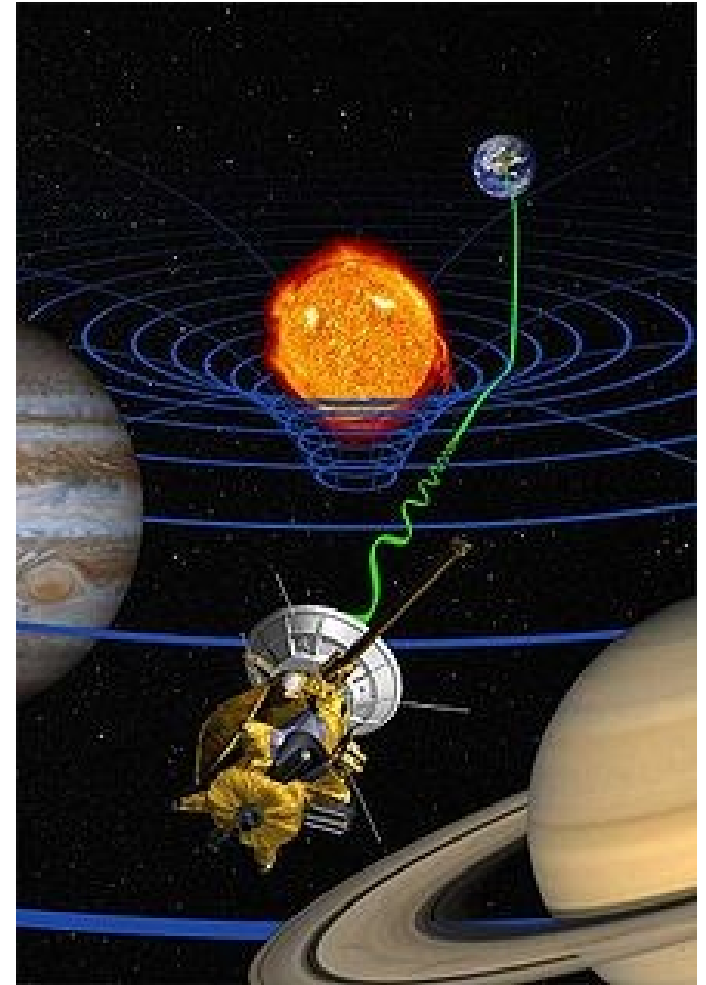
Πειραματικός έλεγχος της παραμέτρου $\bar{\gamma}$

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

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

Το 2014-2016: αντίστοιχο πείραμα κατά τη διάρκεια της αποστολής *BepiColombo* του ΕΟΔ (ESA) στον Ερμή.

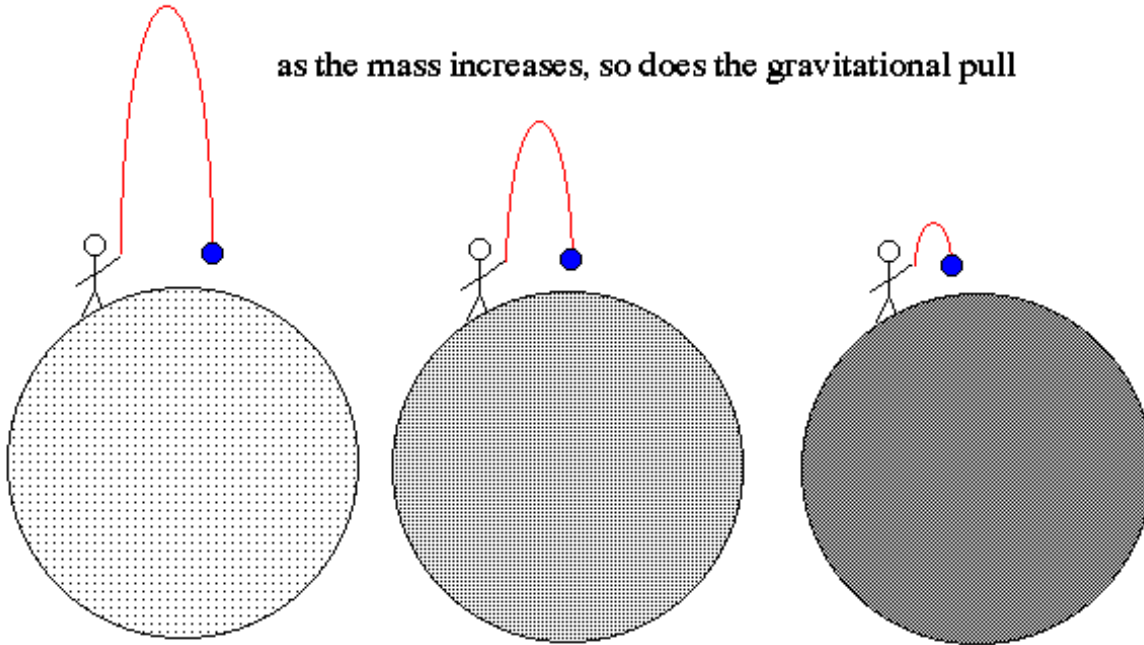


Εικόνα 16: Αποστολή ραδιοκυμάτων στη Γη από το διαστημόπλοιο *Cassini* [16].

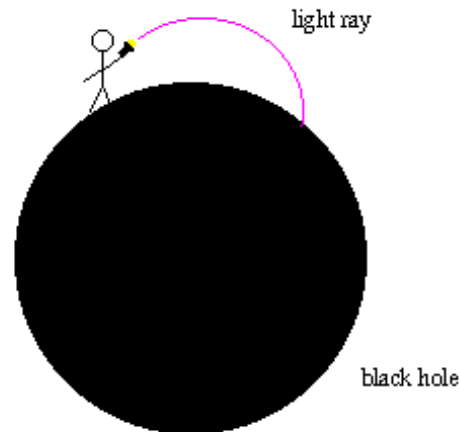
Μελανές Οπές

Black Hole

as the mass increases, so does the gravitational pull

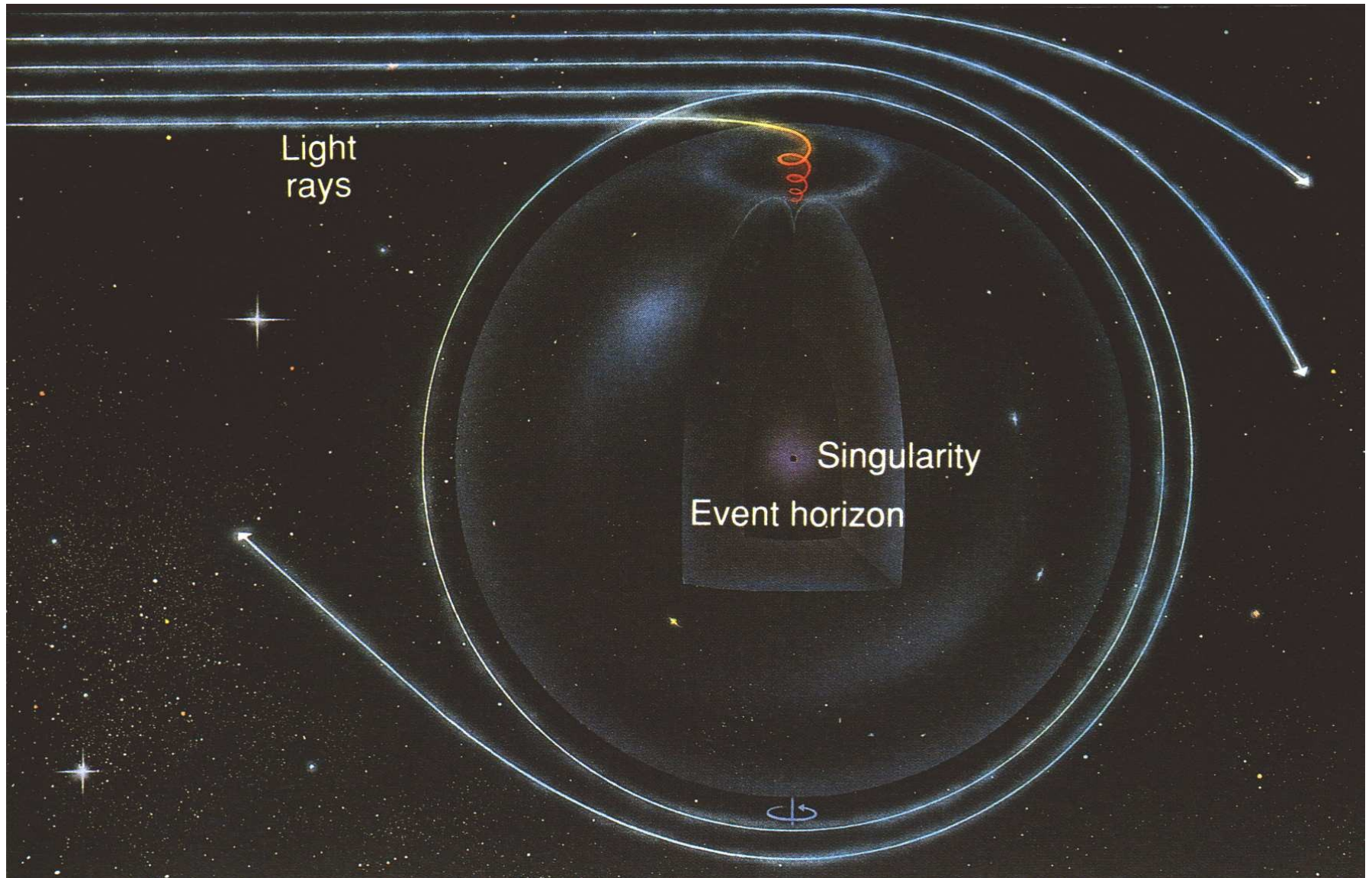


if the gravitational pull is such that even light cannot escape, then a black hole forms



Εικόνα 17: Το Νευτώνειο ανάλογο της έννοιας της μελανής οπής (J. Michell, 1783) [17].

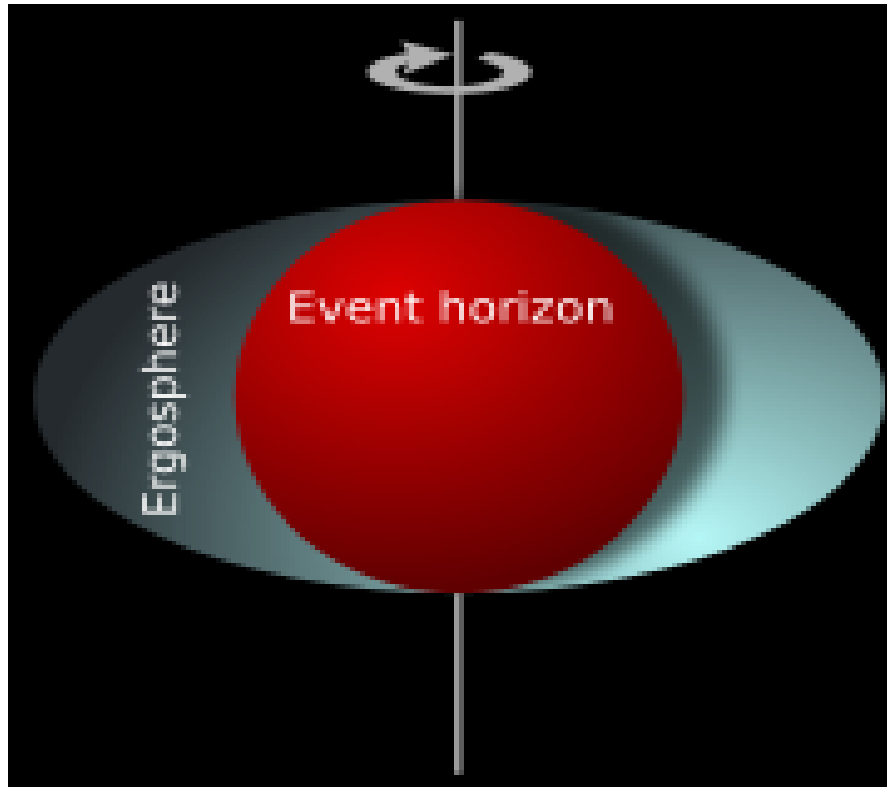
Φωτόνια Κοντά σε Μελανές Οπές



Εικόνα 18: Τροχιές φωτονίων για διέλευση κοντά σε μελανή οπή. Φωτόνια με μικρή παράμετρο κρούσης παγιδεύονται εντός του ορίζοντα γεγονότων της μελανής οπής [18].

Δομή Μιας Μελανής Οπής

Προβλέπονται από τη Γενική Θεωρία Σχετικότητας
Schwarzschild (1916): στατική μελανή οπή
Kerr (1963): περιστρεφόμενη μελανή οπή



Εικόνα 19: Ορίζοντας γεγονότων και εργόσφαιρα μελανής οπής. Εντός της εργόσφαιρας, ένα σώμα εξαναγκάζεται σε περιστροφή [19].

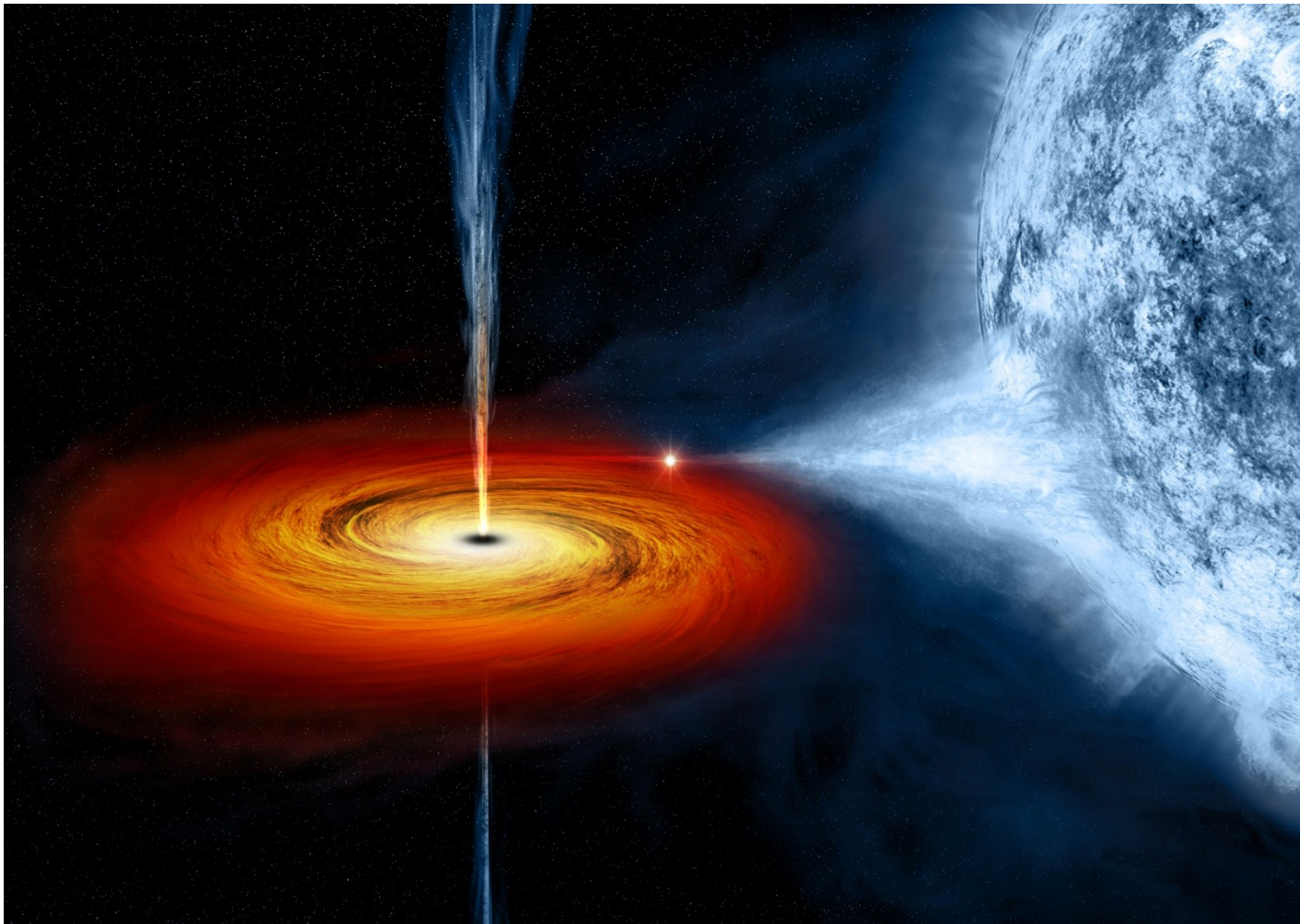
Τίποτε (ούτε το φως) δε ξεφεύγει από τον ορίζοντα γεγονότων. Στην εργόσφαιρα, κανένα σωματίδιο δεν μπορεί να παραμείνει στατικό.

Μελανή Οπή σε Διπλό Σύστημα

Δημιουργείται Δίσκος Προσαύξησης:

Έντονη ακτινοβολία στις Ακτίνες-Χ

Δημιουργία πίδακα ύλης με ταχύτητες κοντά σ' αυτή του φωτός

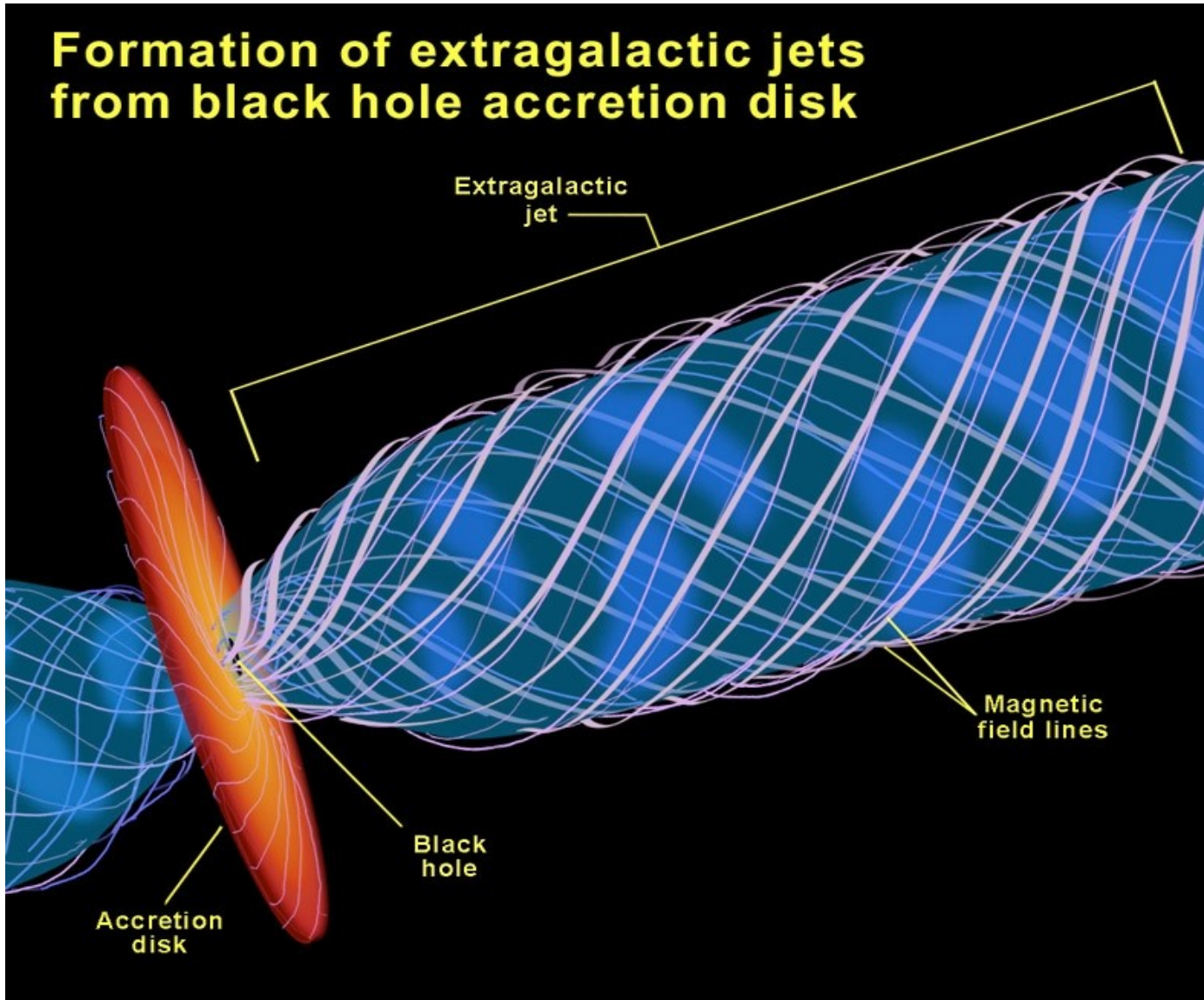


Εικόνα 20:
Καλλιτεχνική αναπαράσταση δίσκου προσαύξησης της μελανής οπής Cygnus-X1. Η μελανή οπή αποσπά ύλη από τον κοντινό κυανό αστέρα [20].

Δημιουργία Πίδακα

Ο πίδακας σταθεροποιείται από μαγνητικά πεδία.

Formation of extragalactic jets from black hole accretion disk



Εικόνα 21:
Καλλιτεχνική
αναπαράσταση των
μαγνητικών πεδίων του
πίδακα μελανής οπής
[21].

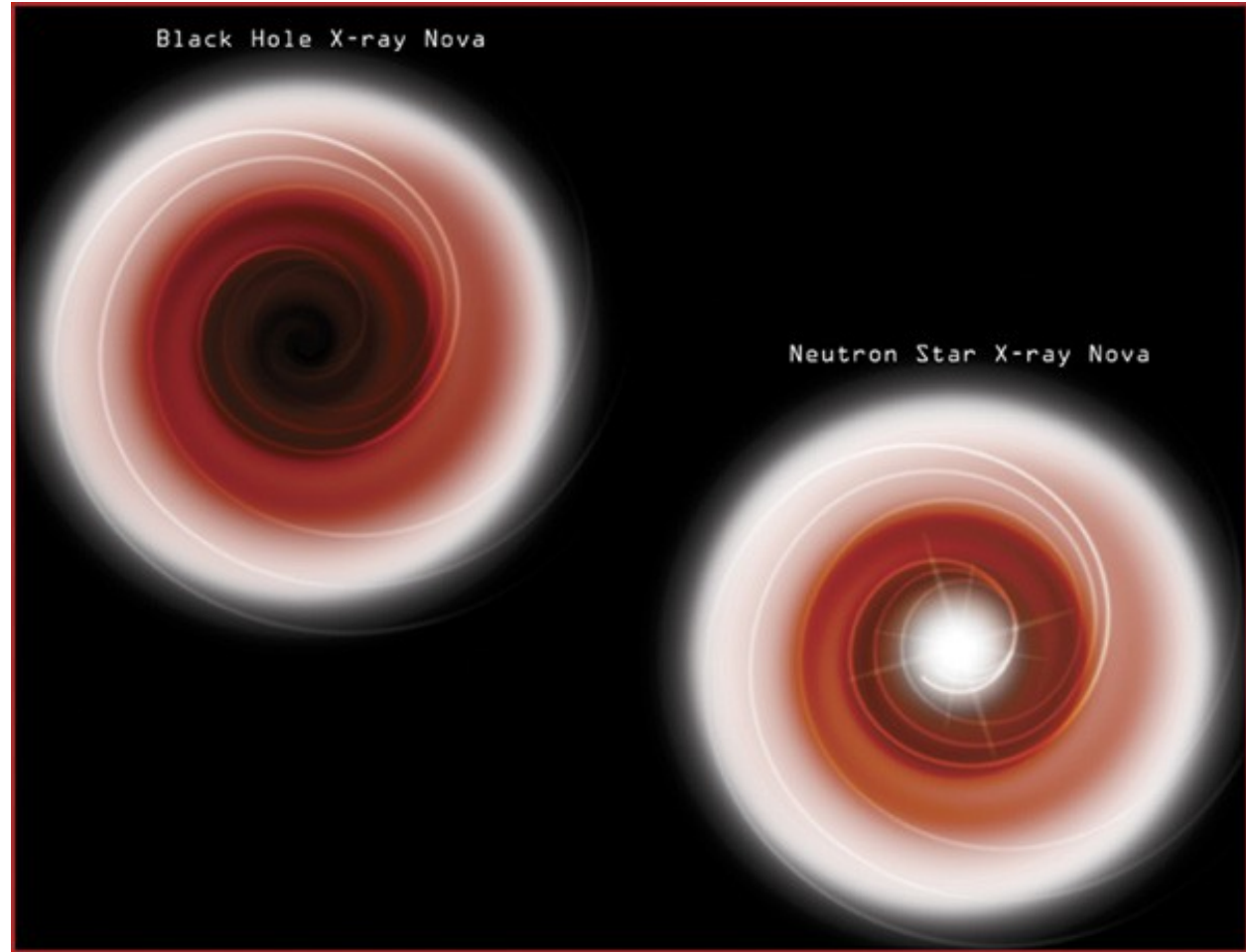
Διαφορά Μελανής Οπής και Αστέρα Νετρονίων

ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ:

Η ύλη περνά τον ορίζοντα γεγονότων χωρίς έκλαμψη.

ΑΣΤΕΡΑΣ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ:

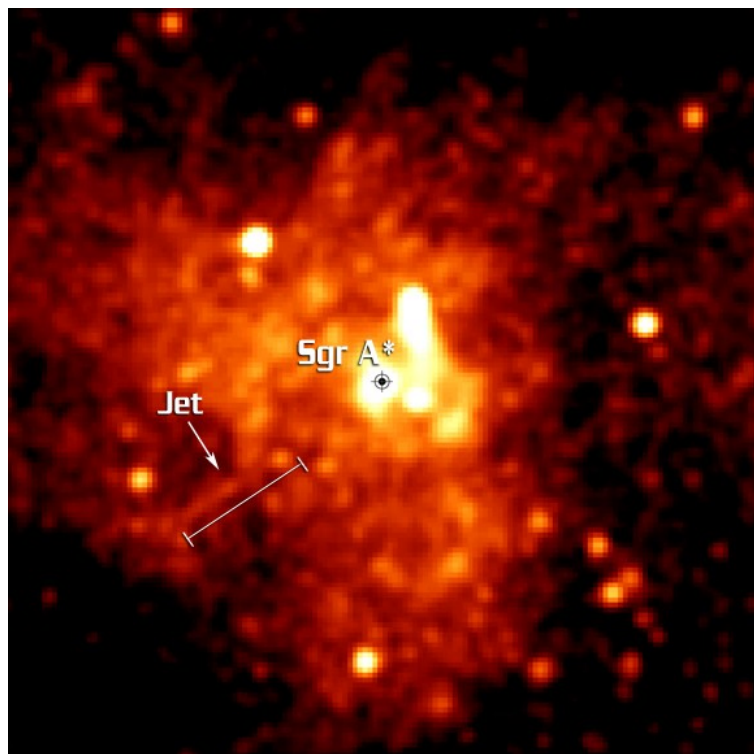
Η ύλη συγκρούεται με την επιφάνεια του αστέρα: **έκλαμψη!**



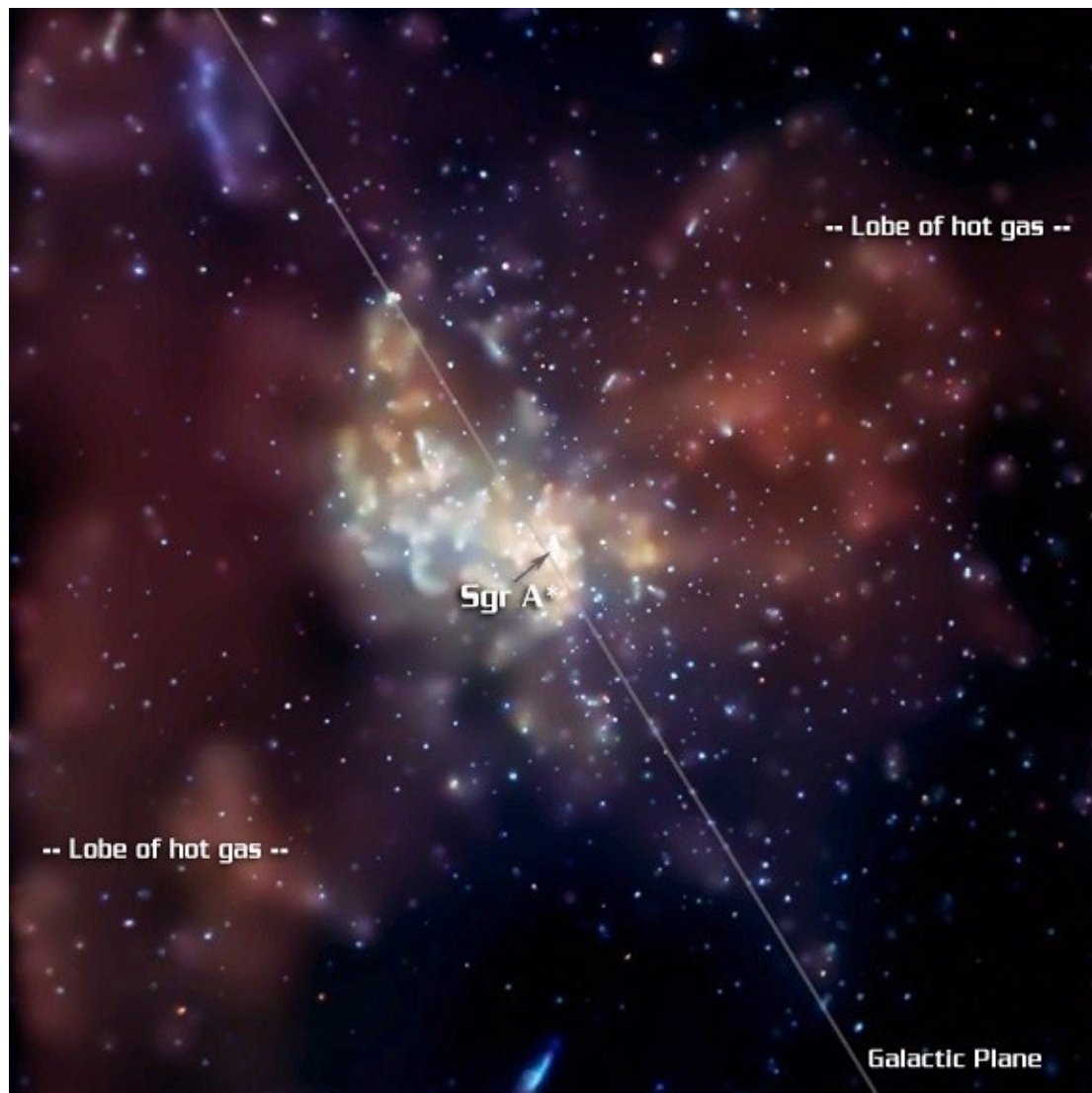
Εικόνα 22: Η βαρυτική μετατόπιση προκαλεί εξασθένηση της έντασης του φωτός, καθώς η ύλη πλησιάζει μια μελανή οπή (αριστερά) ή έναν αστέρα νετρονίων (δεξιά). Στην περίπτωση της μελανής οπής η ύλη διαπερνά τον ορίζοντα γεγονότων, ενώ στην περίπτωση του αστέρα νετρονίων παρατηρείται έκλαμψη όταν η ύλη προσκρούει στην επιφάνειά του [22].

Η Μελανή Οπή στο Κέντρο του Δικού μας Γαλαξία

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



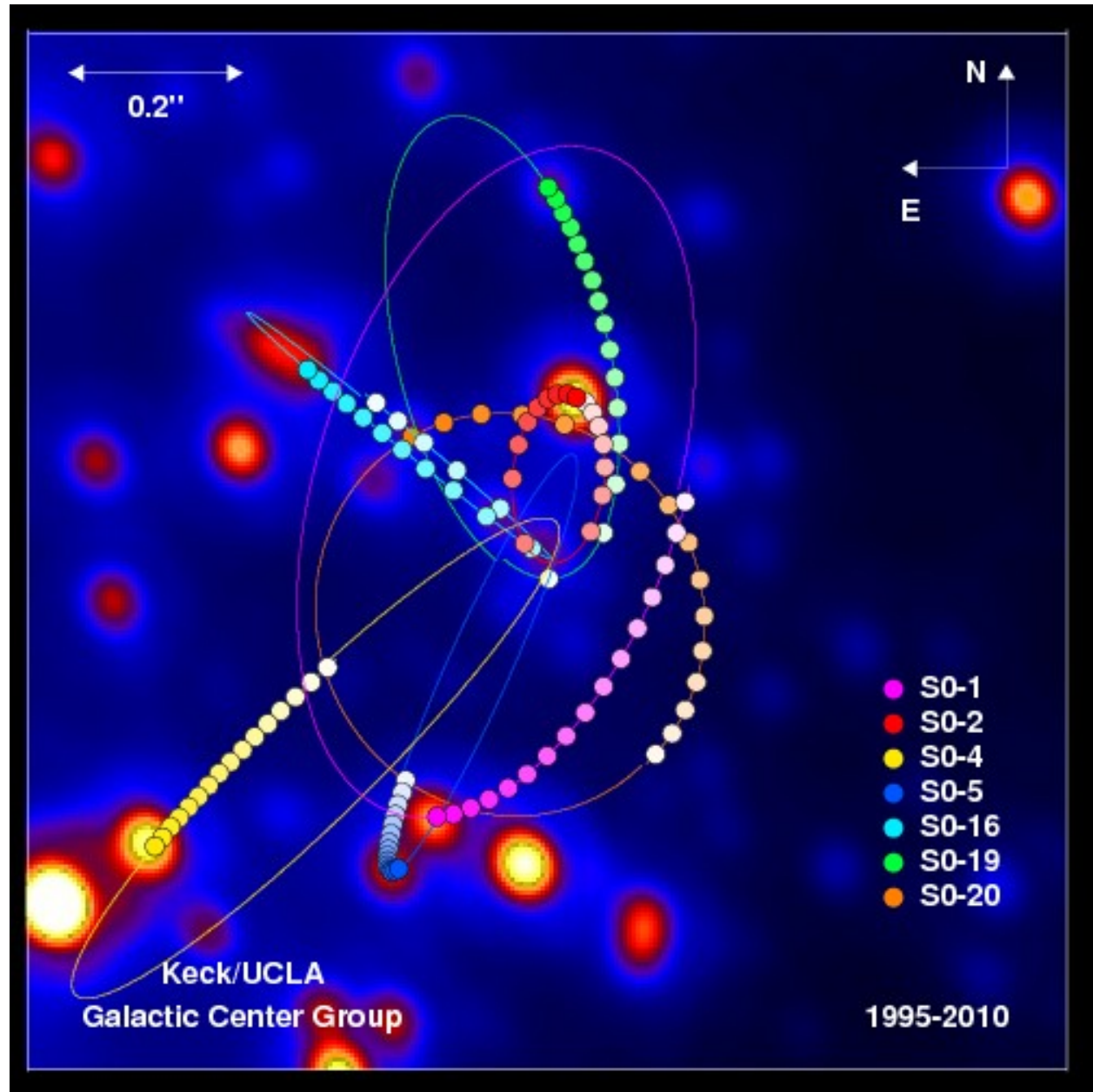
Εικόνα 23: Η μελανή οπή Sgr A* και πίδακας ακτίνων-Χ, μήκους 1.5 έτους φωτός [23]



Εικόνα 24: 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 [24].

Η Μ.Ο. στο Κέντρο του Δικού μας Γαλαξία (Sgr A*)

Από μακροχρόνιες παρατηρήσεις της κίνησης των άστρων γύρω από τον Sgr A* υπολογίσθηκε η μάζα της μελανής οπής ίση με 3.7 εκατομμύρια ηλιακές μάζες.

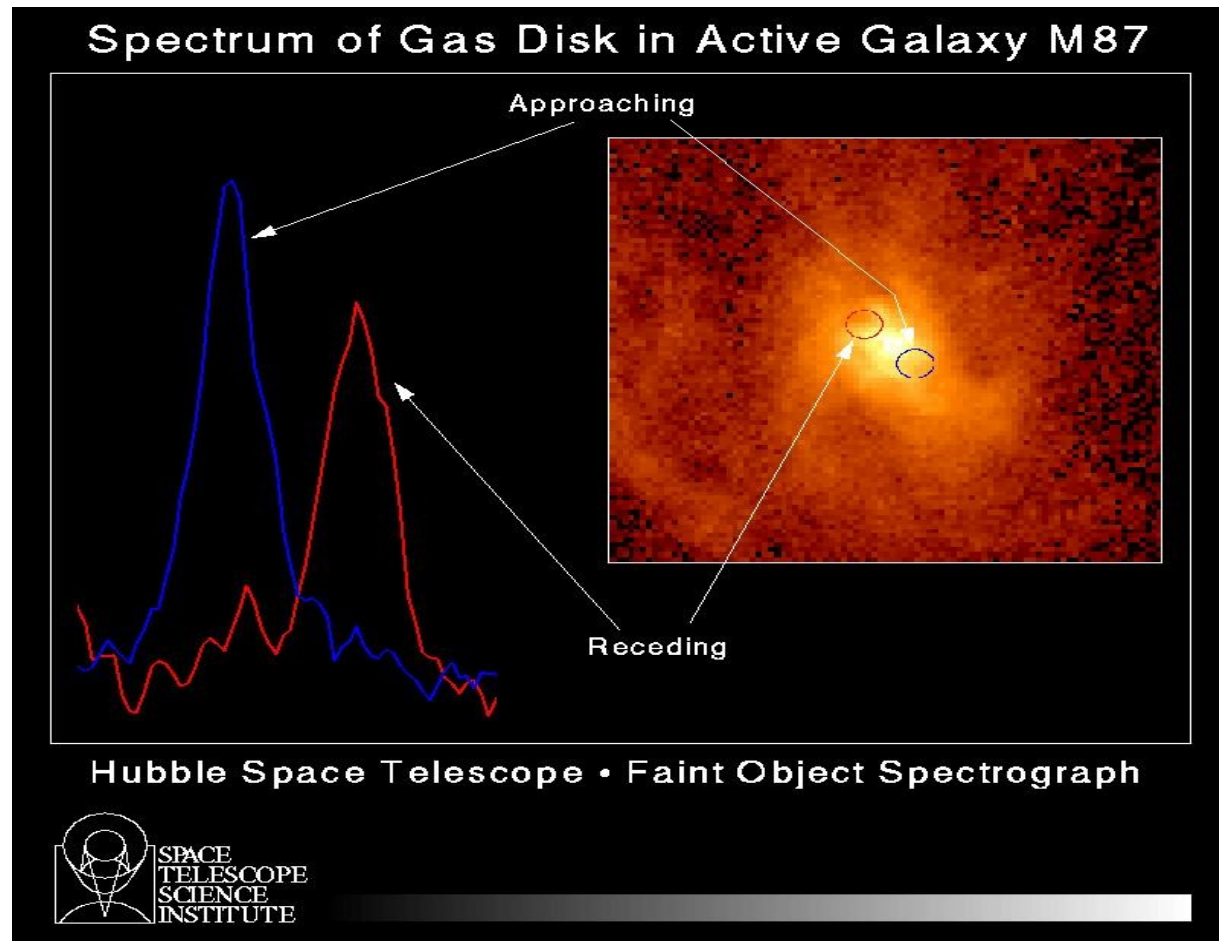


Εικόνα 25: Τροχιές αστέρων στην περιοχή των κεντρικών 1.0 x 1.0 δευτέρων λεπτών του τόξου του Γαλαξία [25].

Μέτρηση Ταχυτήτων Κοντά σε Μελανή Οπή

Μέσω του φαινομένου της **μετάθεσης Doppler** γνωστών φασματικών γραμμών μετρήθηκαν ταχύτητες **~ 550 km/s**.

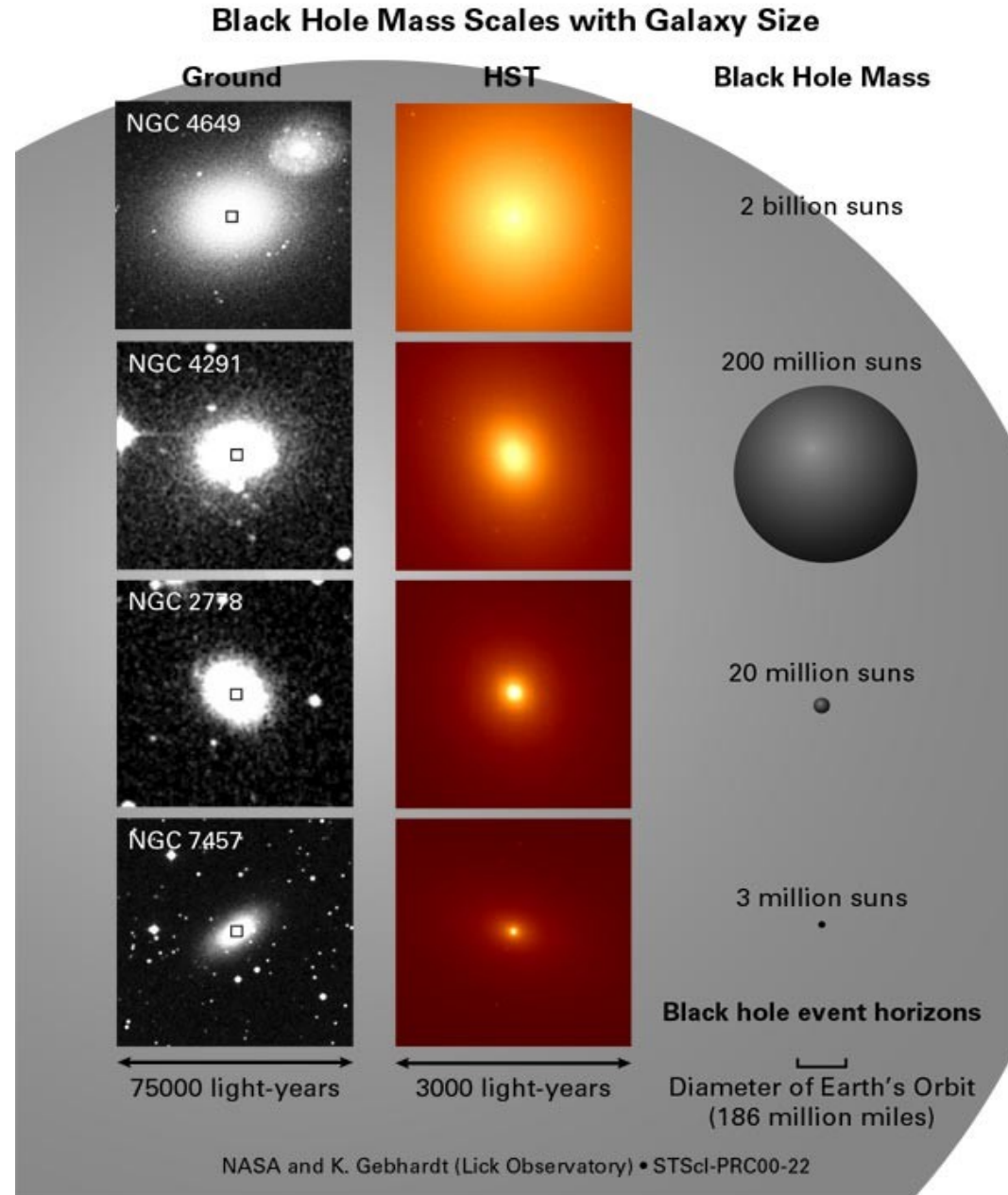
Η μάζα που δημιουργεί το βαρυτικό πεδίο είναι **3 δισεκατομμύρια ηλιακές μάζες**.



Εικόνα 26: Διάγραμμα των ταχυτήτων που μετρήθηκαν σε περιστρεφόμενο δίσκο θερμού αερίου στο κέντρο του ενεργού γαλαξία M87 [26].

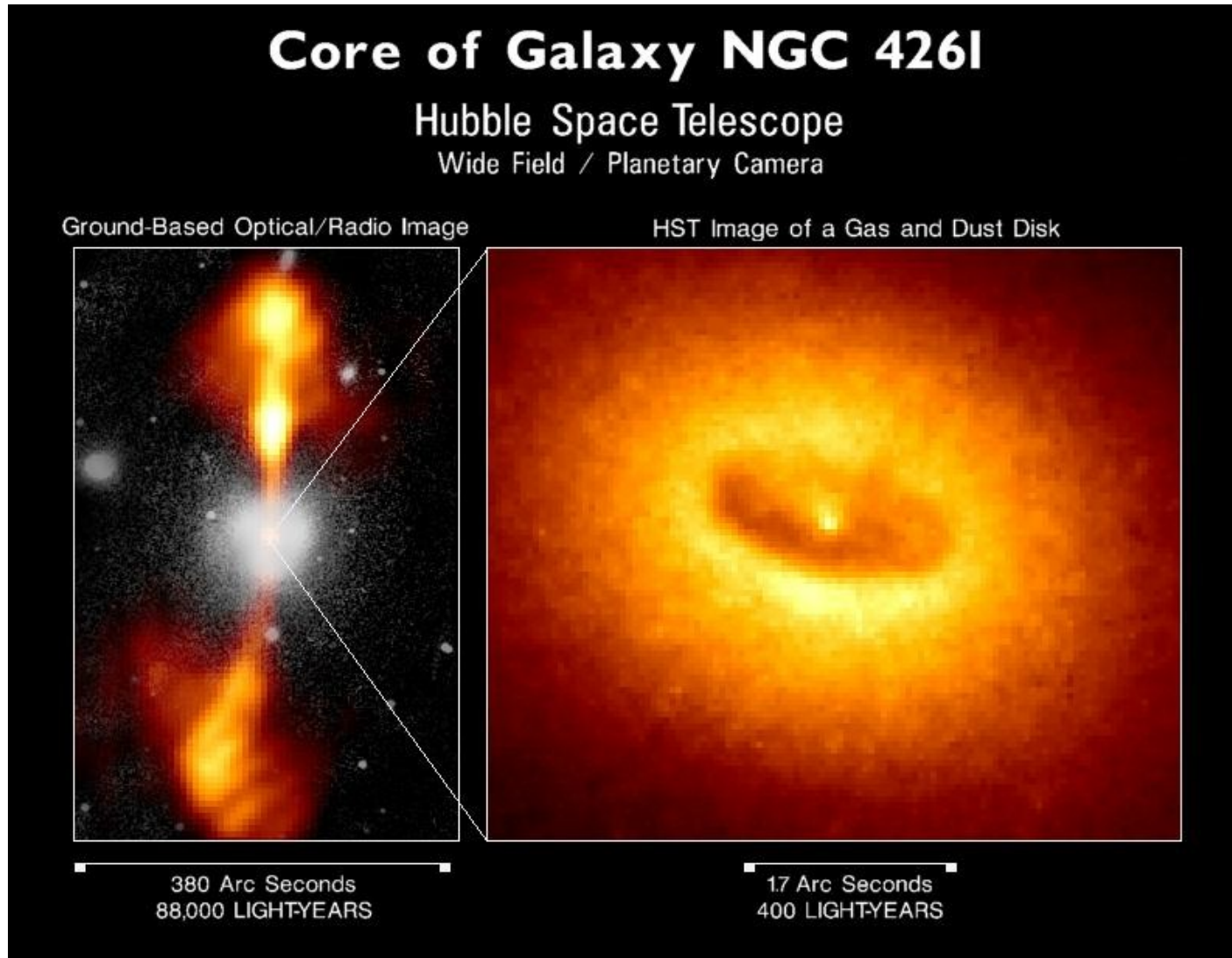
Μάζα Γαλαξιακής Μελανής Οπής

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



Εικόνα 27: 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 διαμέτροι των οριζόντων γεγονότων τους [27].

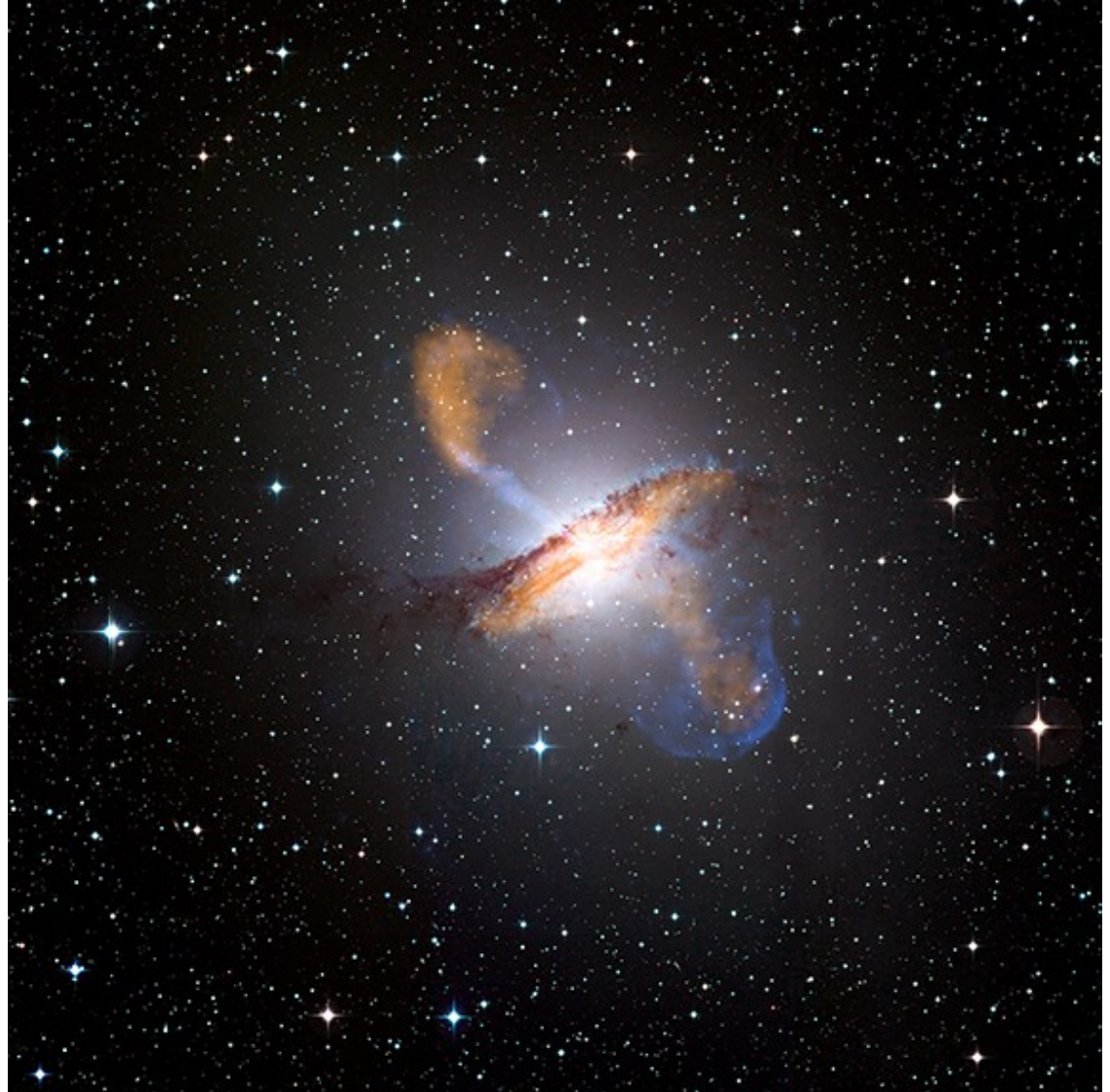
Πίδακας Από Γαλαξιακή Μελανή Οπή



Εικόνα 28: 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 [28].

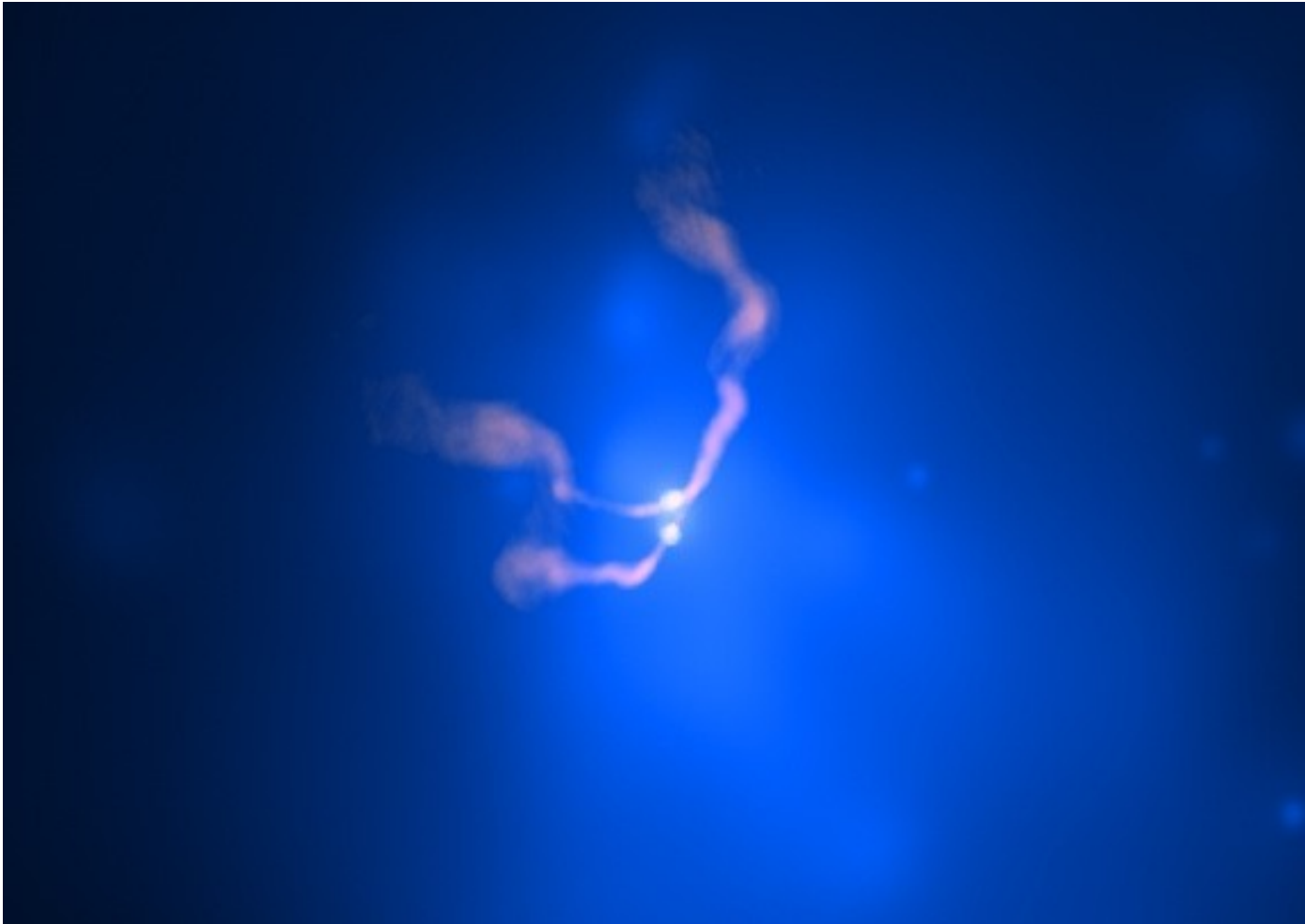
Συνδυασμός Παρατηρήσεων

Συνδυασμένες παρατηρήσεις στο οπτικό, ραδιοφωνικό και ακτίνες-Χ



Εικόνα 29: Συνδυασμός δεδομένων από παρατηρήσεις σε ακτίνες-Χ, ραδιοκύματα και οπτικό φως αποκαλύπτει πίδακες και λοβούς αερίων στην κεντρική μελανή οπή του γαλαξία Centaurus A [29].

Ζεύγη Γαλαξιακών Μελανών Οπών



Εικόνα 30: Το σμήνος γαλαξιών Abell 400, σε εικόνα από συνδυασμό παρατήρησης σε ακτίνες-Χ (ροζ) και ραδιοκύματα (μπλε). Οι πίδακες (ροζ) βρίσκονται εντός θερμού νέφους αερίων που εκπέμπει ακτίνες-Χ (μπλε). Τα λαμπρά αντικείμενα στο κέντρο είναι διπλό σύστημα γαλαξιακών μελανών οπών, των οποίων η κίνηση μπορεί να βρεθεί εξετάζοντας το σχήμα και την κατεύθυνση των πιδάκων [30].

Μαγνητισμένη Μελανή Οπή

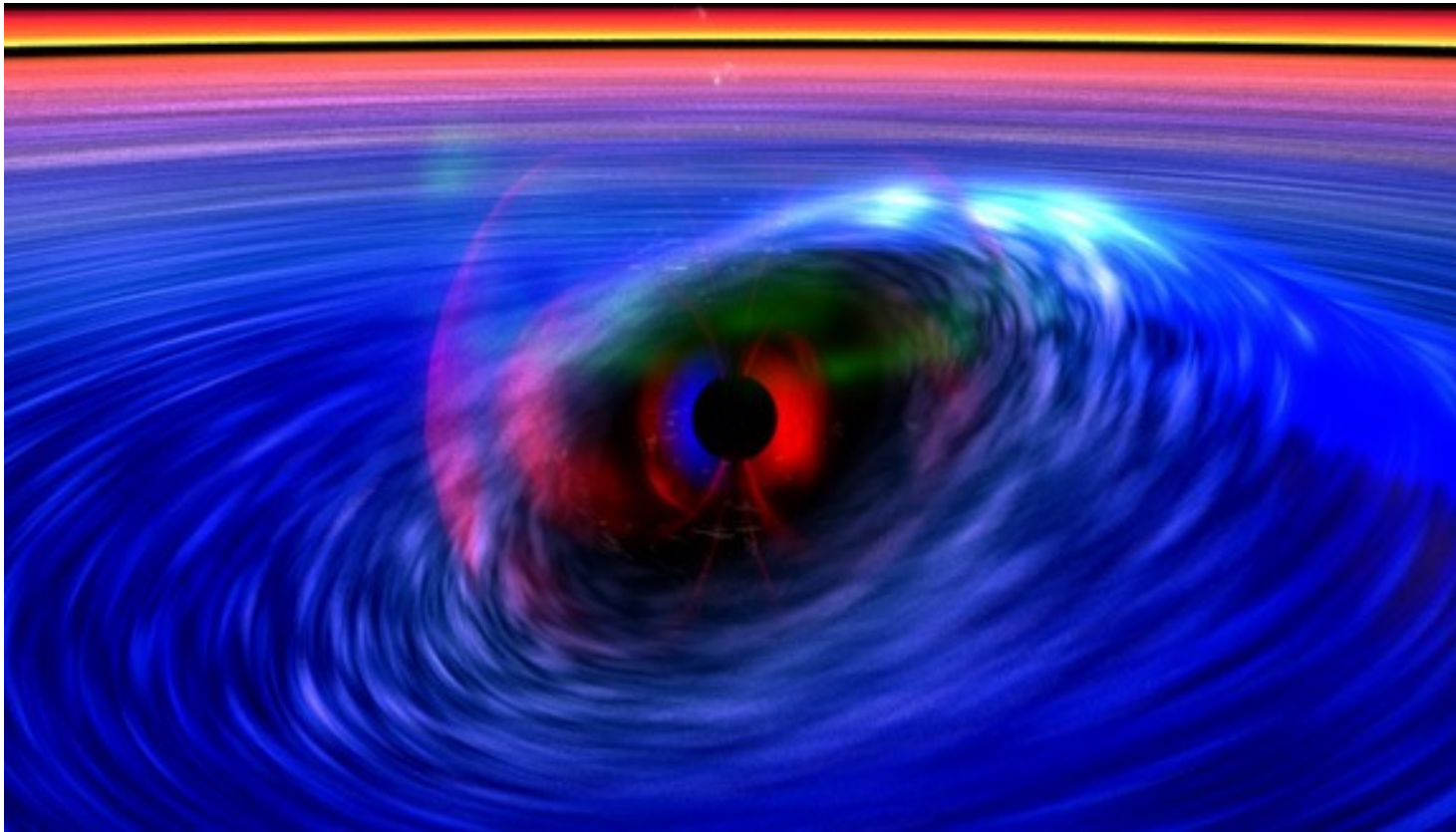
Οι μελανές οπές μαγνητίζονται από το δίσκο ύλης που τις περιβάλλει.



Εικόνα 31: Καλλιτεχνική απεικόνιση ύλης γύρω από περιστρεφόμενη μελανή οπή. Η ισχυρή βαρύτητα συμπυκνώνει τις μαγνητικές γραμμές στην περιοχή της μελανής οπής, επιβραδύνοντας την περιστροφή της. Η ενέργεια περιστροφής που χάνεται μεταφέρεται στην ύλη που βρίσκεται στην περιοχή του ορίζοντα γεγονότων [31].

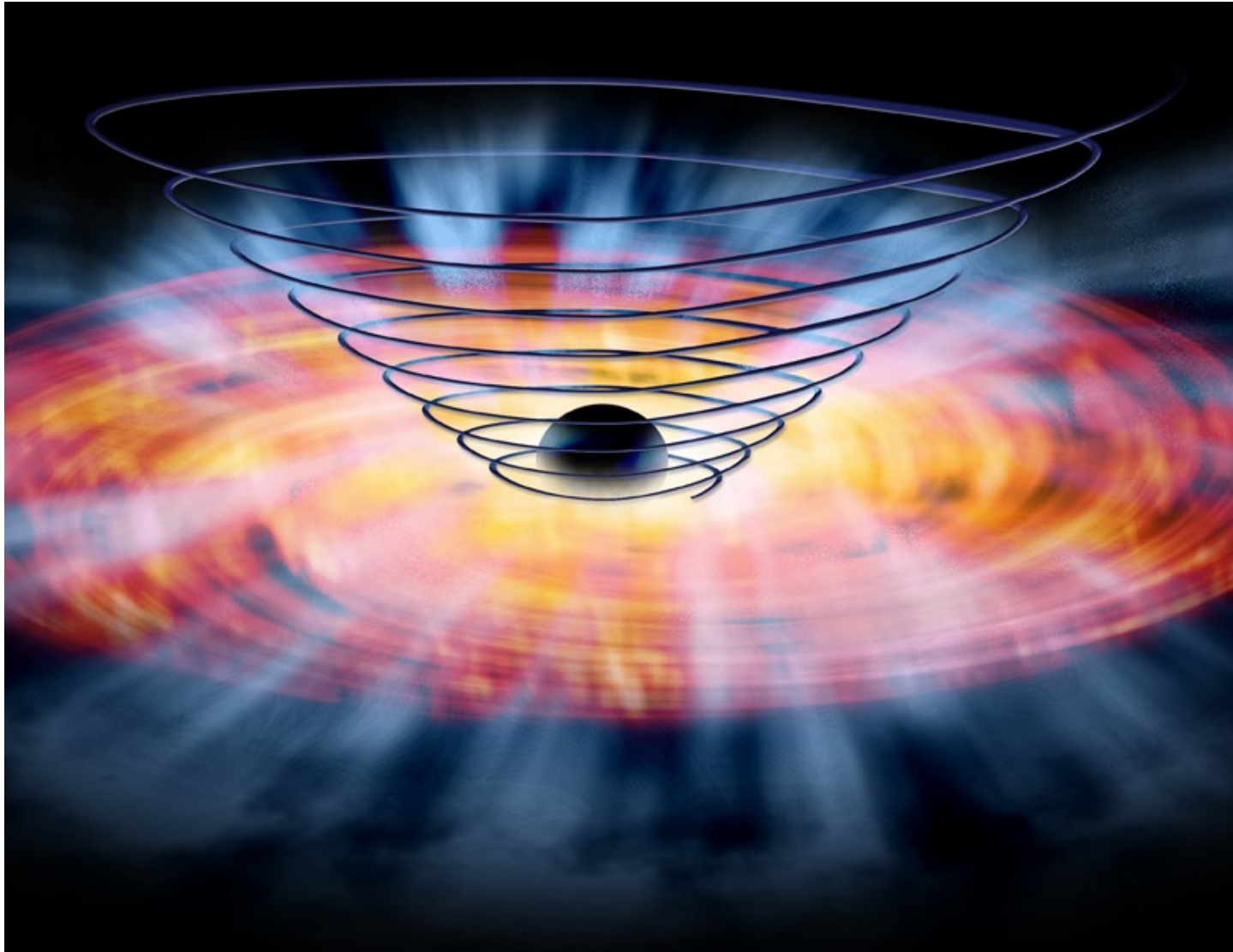
Στρέβλωση του Δίσκου Προσαύξεσης

Ο χώρος και ο χρόνος παραμορφώνονται έντονα κοντά σε μια περιστρεφόμενη μελανή οπή.
Ως αποτέλεσμα υπάρχει μια στρέβλωση στο δίσκο προσαύξεσης.



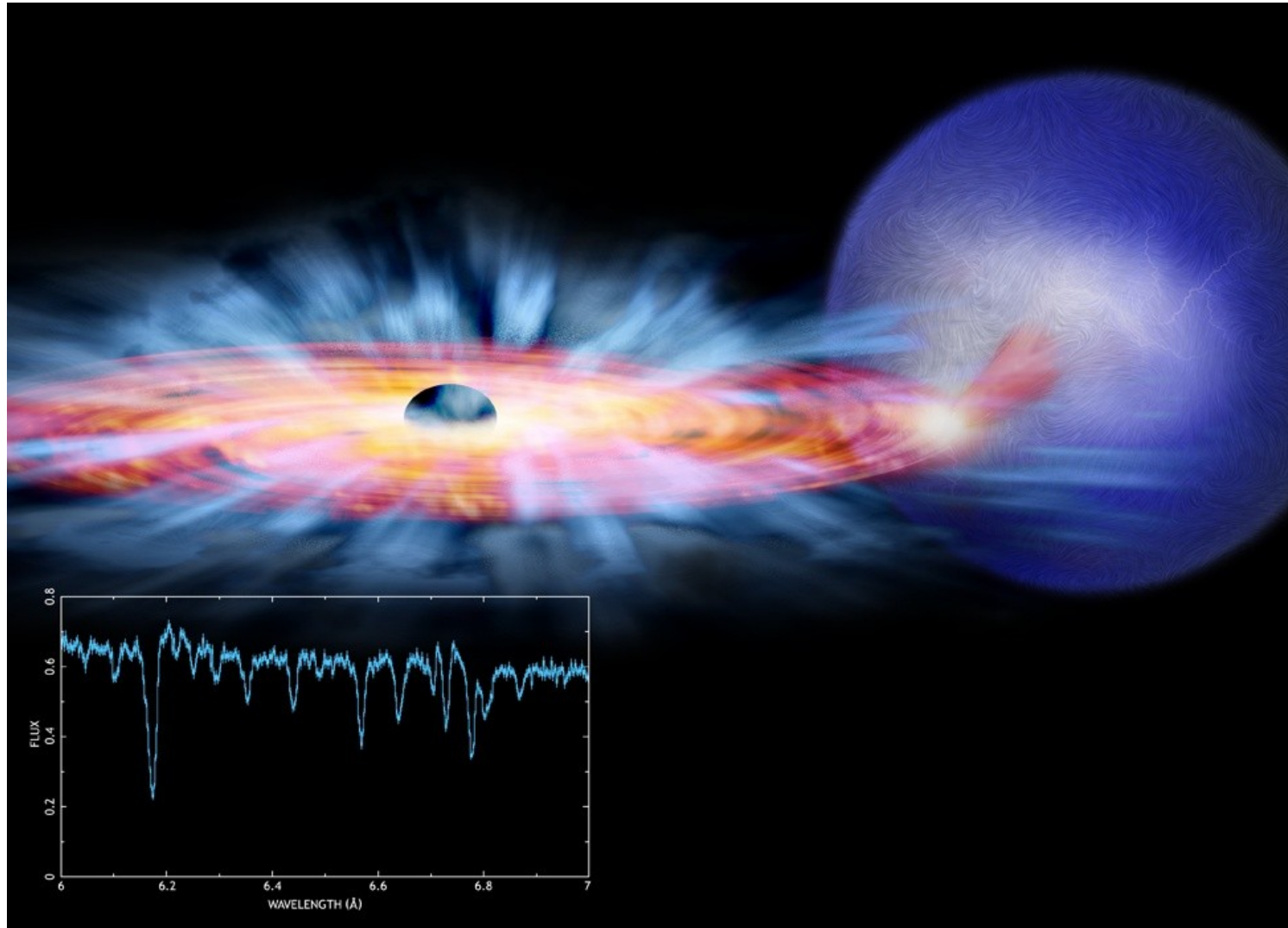
Εικόνα 32: Στρέβλωση του χωροχρόνου στο δίσκο προσαύξεσης γύρω από μελανή οπή [32].

Δημιουργία Ανέμου στο Δίσκο



Εικόνα 33: Μαγνητικά πεδία από την ύλη που περιστρέφεται γυρω από την μελανή οπή, προκαλούν ισχυρούς ανέμους που απομακρύνουν φορτισμένα σωματίδια και συνεπώς στροφορμή, κάνοντας δυνατή την προσαύξηση [33].

Παρατηρήσεις Μεταβολών στο Δίσκο



Εικόνα 34: Το φάσμα ακτίνων-Χ στο διπλό σύστημα GRO J1655-40 δείχνει την ύπαρξη τυρβώδους ανέμου θερμού αερίου γύρω από τη μελανή οπή. Όπως φαίνεται, μεγάλο μέρος του αερίου κινείται προς τη μελανή οπή, αλλά ένα ποσοστό (30%) απομακρύνεται [34].

Πηγές Εικόνων

- [1] Perihelion Precession,
Public Domain (http://en.wikipedia.org/wiki/File:Perihelion_precession.svg)
- [2] Urbain Le Verrier,
Public Domain (http://en.wikipedia.org/wiki/File:Urbain_Le_Verrier.jpg)
- [3] Henri Poincare,
Public Domain (http://en.wikipedia.org/wiki/File:Henri_Poincar%C3%A9-2.jpg)
- [4] Equivalence Principle,
ThinkQuest (Copyright - display for educational and noncommercial purposes)
<http://library.thinkquest.org/04apr/01330/currentphysics/generalrelativity.htm#>
- [5] Dr. SH Connell, Phys284 Lecture Notes
Schonland Research Centre for Nuclear Sciences,
School of Physics, University of the Witwatersrand
<http://psi.phys.wits.ac.za/teaching/Connell/>
- [6] 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

Πηγές Εικόνων

- [7] Hero of Alexandria,
Public Domain - Wikimedia Commons,
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hero_of_Alexandria.png
- [8] Arthur Stanley Eddington,
Public Domain - Wikimedia Commons,
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arthur_St Stanley_Eddington.jpg
- [9] Gravitational Lensing in Action,
NASA, ESA & L. Calcada
<http://www.spitzer.caltech.edu/images/3583-ssc2011-05b-Gravitational-Lensing-in-Action>
- [10] A Horseshoe Einstein Ring from Hubble
ESA/Hubble & NASA
<http://apod.nasa.gov/apod/ap111221.html>
- [11] The Gravitational Lens G2237 + 0305
NASA, ESA, and STSCI
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1990/20/image/a/>
- [12] Modern Tests of the Equivalence Principle
NASA Science News,
http://science1.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2007/18may_equivalenceprinciple/

Πηγές Εικόνων

- [13] Apollo Laser Reflector,
NASA
http://www.nasa.gov/centers/goddard/images/content/191431main_apollo_laser_reflector.jpg
- [14] Lunar Laser Ranging at the McDonald Observatory,
NASA Science News, “What Neil % Buzz Left On The Moon”
http://science1.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2004/21jul_llr/
- [15] Principle of the atom interferometry measurement with STE-QUEST.
Credit: European Space Agency
<http://sci.esa.int/ste-quest/49265-science-goals/>
- [16] Saturn-Bound Spacecraft Tests Einstein's Theory, NASA JPL News,
<http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=133>
- [17] 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>
- [18] Rays of light being effected by a Black Hole
Newbury Astronomical Society, Absolute Beginners - Black Holes
<http://naasbeginners.co.uk/AbsoluteBeginners/Blackholes.htm>

Πηγές Εικόνων

- [19] Ergosphere, Wikimedia Commons
Author: User MesserWoland
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ergosphere.svg>
- [20] Cygnus X-1, NASA Education
What is a Black Hole?
Credit: NASA/CXC/M.Weiss
- [21] 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/>
- [22] "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>
- [23] 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>

Πηγές Εικόνων

- [24] 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>
- [25] 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>
- [26] 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/>
- [27] Black Holes Shed Light on Galaxy Formation
Credit: NASA and Karl Gebhardt (Lick Observatory)
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2000/22/image/a/>

Πηγές Εικόνων

- [28] Dust Disk Fuels Black Hole in Giant Elliptical Galaxy NGC 4261
Credit: Walter Jaffe/Leiden Observatory, Holland Ford/JHU/STScI, and NASA
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1992/27/image/b/>
- [29] Jets from Unusual Galaxy Centaurus A
Credit: ESO/WFI (visible); [MPIfR/ESO/APEX](#)/A. Weiss et al. (microwave);
NASA/CXC/CfA/R. Kraft et al. (X-ray); *Inset*: NASA/TANAMI/C. Müller et al. (radio)
<http://apod.nasa.gov/apod/ap110531.html>
- [30] 3C 75 in Abell 400: Black Holes Determined to be Bound
Credit: X-ray: NASA/CXC/AlfA/D.Hudson & T.Reiprich et al.; Radio: RAO/VLA/NRL
<http://chandra.harvard.edu/photo/2006/a400/>
- [31] Artists conception of matter swirling around a black hole, both in the accretion disk and captured by the magnetic field.
NASA, Imagine the Universe
<http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/features/news/24oct01.html>
- [32] Spacetime wave orbits black hole
Image courtesy / Dana Berry/CfA/NASA
<http://web.mit.edu/newsoffice/2005/spacetime.html>

Πηγές Εικόνων

[33] Coiled magnetic fields churn into an accretion disk and produce strong winds.

Credit: NASA/CXC/M.Weiss

*[http://www.nasa.gov/vision/universe/starsgalaxies/
chandra_blackhole_magneticfield.html](http://www.nasa.gov/vision/universe/starsgalaxies/chandra_blackhole_magneticfield.html)*

[34] GRO J1655-40: NASA's Chandra Answers Black Hole Paradox

Illustration: NASA/CXC/M.Weiss;

X-ray Spectrum: NASA/CXC/U.Michigan/J.Miller et al.

<http://chandra.harvard.edu/photo/2006/j1655/>



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

