

## Η στρέβλωση του χώρου και του χρόνου από την ύλη και οι συνέπειές της

Άρθρο, Ιούνιος 2003

Το 1915 ο Albert Einstein πρότεινε στα πλαίσια της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας, μια επαναστατική αντιμετώπιση για την ερμηνεία των φαινομένων της βαρύτητας. Θεώρησε ότι για να εξηγήσουμε την συμπεριφορά των σωμάτων μέσα στα βαρυτικά πεδία, θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε τις μεταβολές που προκαλούν τα διάφορα σώματα στη γεωμετρία του χωροχρόνου που τα περιβάλλει, και στη συνέχεια να εξετάσουμε πως ο στρεβλωμένος χωροχρόνος επηρεάζει τις τροχιές άλλων σωμάτων που θα βρεθούν στην περιοχή εκείνη.

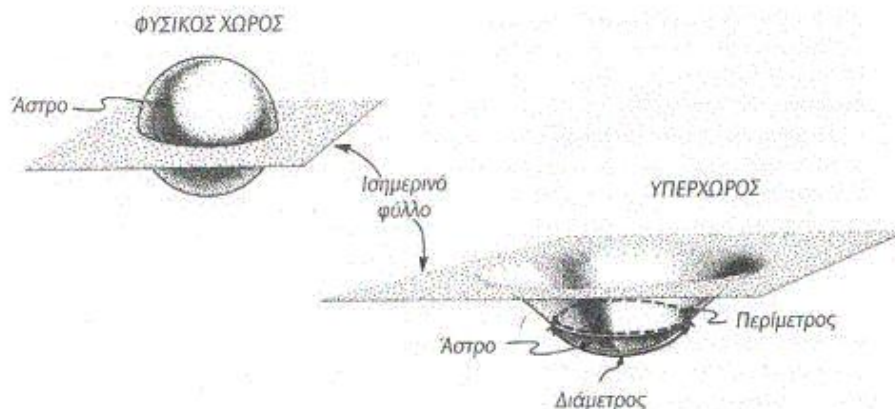
Με τον τρόπο αυτό, αντί να μιλάμε για δυνάμεις μεταξύ σωμάτων όπως γίνεται στην παλιά Νευτώνεια θεωρία, εξηγούμε όλες τις αλληλεπιδράσεις ως γεωμετρικές ιδιότητες του στρεβλωμένου χωροχρόνου.

Τι εννοούμε όμως όταν λέμε ότι μια μάζα στρεβλώνει τον χωροχρόνο που την περιβάλλει;

### Η στρέβλωση του χώρου

Ας ξεκινήσουμε θεωρώντας για απλούστευση, ένα άστρο σφαιρικό και μη περιστρεφόμενο. Ένας παρατηρητής στο ίδιο σύστημα αναφοράς με το άστρο είναι πολύ δύσκολο να φανταστεί και να αποδώσει σχεδιαστικά τον καμπυλωμένο τρισδιάστατο χώρο μέσα στον οποίο ζει. Για να μπορέσει να κάνει κάτι τέτοιο θα έπρεπε να βρεθεί ο παρατηρητής μας σε έναν υπερχώρο περισσότερων διαστάσεων, και να παρατηρεί από εκεί τον δικό μας συνηθισμένο τρισδιάστατο χώρο. Αποδεικνύεται μάλιστα ότι ο υπερχώρος που θα μπορούσε να φιλοξενήσει ένα στρεβλωμένο τρισδιάστατο χώρο, θα έπρεπε να ήταν 6 διαστάσεων.

Υπάρχει όμως ένα νοητικό τέχνασμα που μας βοηθάει να συλλάβουμε αυτή τη στρέβλωση του χώρου.



Εικόνα 1.

Στην εικόνα 1, θεωρούμε ότι βάζουμε ένα λεπτό φύλλο από ελαστικό υλικό στο ισημερινό επίπεδο του άστρου. Παρότι στο αριστερό μέρος της εικόνας το φύλλο αυτό φαίνεται επίπεδο, στην πραγματικότητα δεν είναι. Η μάζα του άστρου στρεβλώνει τον χώρο μέσα και γύρω από το άστρο, και η στρέβλωση αυτή καμπυλώνει επίσης το φύλλο.

Οι λεπτομέρειες των παραμορφώσεων του καμπυλωμένου χώρου προβλέπονται από τη λύση Schwarzschild των εξισώσεων που πρότεινε ο Einstein. Εμείς για σχηματίσουμε μια εικόνα της καμπύλωσης Schwarzschild, μπορούμε να φανταστούμε ότι απομακρύνουμε το ισημερινό φύλλο από τον καμπυλωμένο τρισδιάστατο χώρο του πραγματικού μας

Σύμπαντος και ότι το εμβαπτιζουμε σ' έναν εικονικό επίπεδο, τρισδιάστατο υπερχώρο (κάτω δεξιά στην εικόνα 1.)

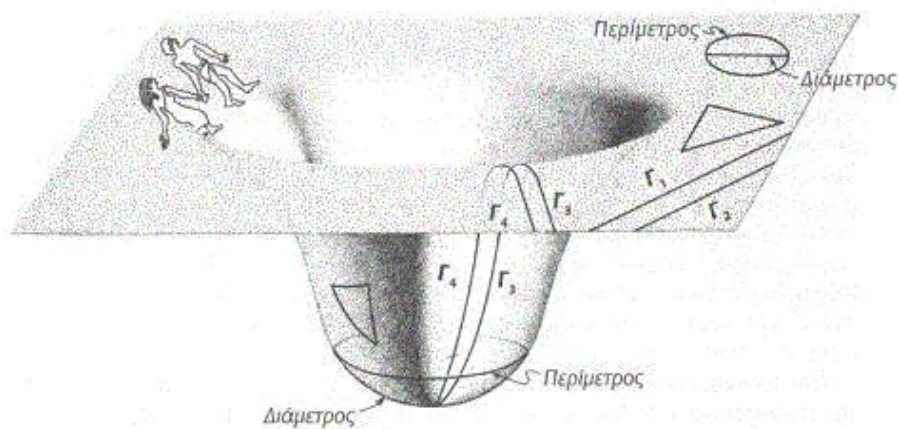
Στον επίπεδο υπερχώρο το φύλλο μπορεί να διατηρήσει την καμπυλωμένη γεωμετρία του μόνο αν καμφθεί, παίρνοντας το σχήμα μιας κούπας. Σε πολλά βιβλία, οι συγγραφείς τους μπαίνουν στον πειρασμό να θεωρήσουν ότι η τρίτη διάσταση του υπερχώρου ταυτίζεται με την τρίτη χωρική διάσταση του δικού μας σύμπαντος. Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν είναι σωστό. Η τρίτη διάσταση του υπερχώρου είναι μια διάσταση στην οποία δεν μπορούμε να εισέλθουμε και από την οποία δεν μπορούμε να πάρουμε καμιά πληροφορία. Πρόκειται για μια τελείως υποθετική διάσταση.

Παρατηρήστε στην εικόνα 1, ότι επί του καμπυλωμένου δισδιάστατου φύλλου, η περίμετρος του άστρου ταυτίζεται με την περίμετρο του πραγματικού άστρου στο πραγματικό Σύμπαν. Αν όμως ως διάμετρο του άστρου αποκαλέσουμε την συντομότερη γραμμή που ενώνει δύο αντιδιαμετρικά σημεία (γεωδειακή), αυτή δεν είναι πια ευθεία γραμμή στον επίπεδο υπερχώρο, αλλά είναι μια καμπύλη.

Πως θα μπορούσαν όμως κάποιοι που ζουν πάνω σ' αυτό το φύλλο να συμπεράνουν την καμπυλότητά του, αφού δεν αντιλαμβάνονται τον υπερχώρο που τους περιβάλλει;

Ας φανταστούμε δυο δισδιάστατα όντα που ζουν πάνω σ' ένα τέτοιο στρεβλωμένο δισδιάστατο φύλλο σχήματος κούπας. (Το φύλλο αυτό θεωρείται δισδιάστατο διότι αρκούν μόνο δύο συντεταγμένες για να προσδιορίσουν κάθε σημείο του.)

Τα δισδιάστατα αυτά όντα μπορούν ν' ανακαλύψουν ότι η εξωτερική περιοχή του κόσμου τους είναι επίπεδη, ενώ η κεντρική περιοχή παρουσιάζει καμπυλότητα, εκτελώντας γεωμετρικές μετρήσεις σε κύκλους και τρίγωνα. Βλέπε εικόνα 2.



Εικόνα 2.

Στην εξωτερική περιοχή η περίμετρος κάθε κύκλου ισούται με τη διάμετρο επί τον αριθμό  $\pi=3,14159..$

Στην εσωτερική περιοχή η περίμετρος ενός κύκλου είναι μικρότερη από το παραπάνω γινόμενο.

Αν τα δισδιάστατα όντα σχεδιάσουν ένα τρίγωνο του οποίου οι πλευρές είναι ευθείες γραμμές με την έννοια των γεωδειακών, και στη συνέχεια υπολογίσουν το άθροισμα των εσωτερικών γωνιών του, θα πάρουν ως αποτέλεσμα  $180^0$  στην εξωτερική επίπεδη περιοχή, και περισσότερο από  $180^0$  στην εσωτερική στρεβλωμένη περιοχή.

Αν σχεδιάσουν επίσης δύο παράλληλες ευθείες γραμμές και τις προεκτείνουν συνεχώς,

τότε θα διαπιστώσουν ότι στη μεν εξωτερική περιοχή αυτές δεν τέμνονται ποτέ, ενώ στην εσωτερική περιοχή τέμνονται στο κατώτατο σημείο της κούπας.

Από τέτοιου είδους παρατηρήσεις μπορούμε συνεπώς να συμπεράνουμε αν ζούμε σ' ένα κόσμο επίπεδο (Ευκλείδιο) ή καμπύλο.

Ας επιστρέψουμε στην εικόνα 1, και ας θεωρήσουμε ότι το άστρο που εξετάζουμε είναι ο Ήλιος μας, με τη συγκεκριμένη μάζα που έχει. Τότε η λύση Schwarzschild της εξίσωσης πεδίου του Einstein προβλέπει ότι ο λόγος της περιμέτρου του άστρου προς τη διάμετρό του είναι μικρότερος του π κατά μερικά εκατομμυριοστά. Δηλαδή μέσα στον Ήλιο, ο χώρος είναι επίπεδος με ακρίβεια μερικών μονάδων προς  $10^6$ . Αν όμως η μάζα του Ήλιου διατηρούνταν σταθερή και η περιμέτρος του γινόταν μικρότερη, τότε η καμπύλωση στο εσωτερικό του θα γινόταν εντονότερη, το κοίλωμα της κούπας θα γινόταν μεγαλύτερο, και ο λόγος περιμέτρου προς τη διάμετρο θα γινόταν εμφανώς μικρότερος από π.

## Η στρέβλωση του χρόνου

Η λύση Schwarzschild της εξίσωσης πεδίου του Einstein, δεν περιγράφει μόνο την στρέβλωση του χώρου κοντά στο άστρο αλλά και τη στρέβλωση του χρόνου που προκαλείται από την ισχυρή βαρύτητα του άστρου.

Σε γενικές γραμμές μπορεί ν' αποδειχτεί ότι ο χρόνος κυλάει πιο αργά κοντά στην επιφάνεια του άστρου, απ' ότι μακριά του. Στο κέντρο του δε κυλάει ακόμα πιο αργά.

Στην περίπτωση του Ήλιου, η στρέβλωση του χρόνου είναι μικρή. Στην επιφάνειά του, η ροή του χρόνου επιβραδύνεται μόνο κατά 2 προς  $10^6$  (64 δευτερόλεπτα ανά έτος), σε σχέση με τη ροή του χρόνου μακριά του, ενώ στο κέντρο του επιβραδύνεται ακόμη περισσότερο δηλαδή κατά 1 προς  $10^5$  (5 λεπτά ανά έτος).

Αν όμως η μάζα του Ήλιου διατηρούνταν σταθερή και η περιμέτρος του γινόταν μικρότερη, τότε αντίστοιχα η βαρυτική διαστολή του χρόνου σ' αυτόν - η στρέβλωση του χρόνου - θα γινόταν μεγαλύτερη.

Μια συνέπεια της στρέβλωσης του χρόνου που μπορεί να ελεγχθεί πειραματικά είναι η βαρυτική μετατόπιση του φωτός που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός άστρου, προς το ερυθρό μέρος του φάσματος. Αφού η συχνότητα του φωτός καθορίζεται από τη ροή του χρόνου στο σημείο εκπομπής του, το φως που ακτινοβολείται από άτομα στην επιφάνεια του άστρου θα έχει μικρότερη συχνότητα όταν φτάνει στη Γη σε σχέση με το φως που εκπέμπεται από το ίδιο είδος ατόμων στο μεσοαστρικό χώρο. Η συχνότητα θα έχει μειωθεί κατά το ίδιο ακριβώς ποσοστό που επιβραδύνεται η ροή του χρόνου. Μικρότερη συχνότητα σημαίνει μεγαλύτερο μήκος κύματος, επομένως το φως του άστρου θα έχει μετατοπιστεί προς το ερυθρό άκρο του φάσματος κατά το ίδιο ποσοστό που διαστέλλεται ο χρόνος στην επιφάνεια του άστρου.

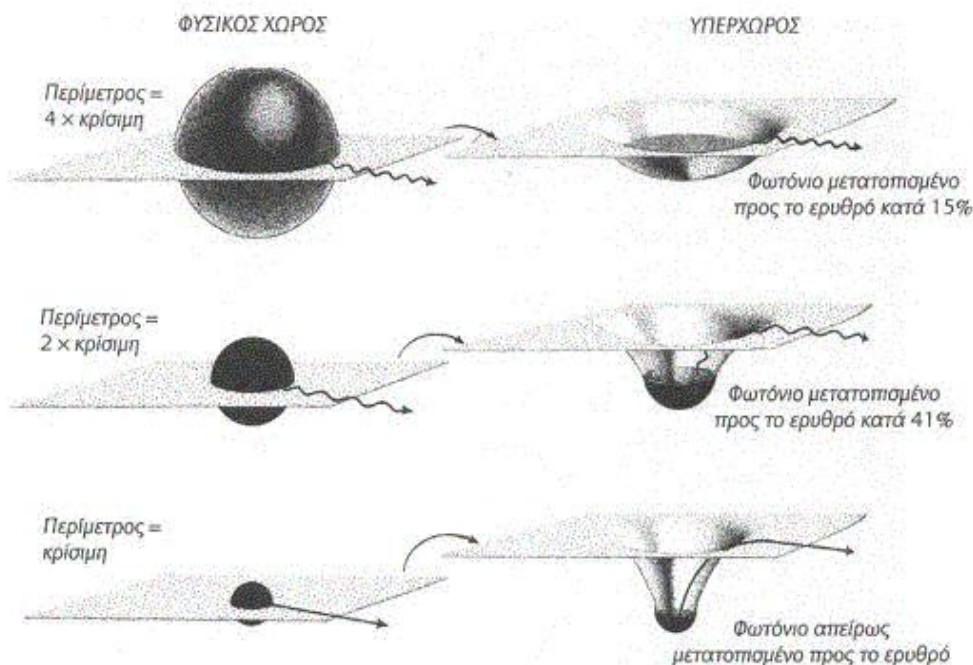
Τα γενικά λοιπόν συμπεράσματα της γεωμετρίας Schwarzschild είναι ότι όσο πιο συμπαγές είναι ένα άστρο, τόσο πιο μεγάλη στρέβλωση προκαλεί στο χωροχρόνο γύρω του, και τόσο πιο μεγάλη είναι η βαρυτική μετατόπιση προς το ερυθρό του φωτός που εκπέμπεται από την επιφάνειά του.

Οι προβλέψεις όμως της λύσης Schwarzschild έχουν και κάποιες ακραίες συνέπειες οι οποίες μοιάζουν τόσο παράξενες που τόσο ο ίδιος ο Einstein όσο και οι μετέπειτα φυσικοί από το 1920 ως το 1960 ήταν απρόθυμοι να τις δεχτούν.

## Η στρέβλωση του χωροχρόνου και οι μαύρες τρύπες

Η γεωμετρία Schwarzschild προβλέπει ότι για κάθε άστρο υπάρχει μια κρίσιμη περίμετρος, η οποία σε χιλιόμετρα δίνεται από τη σχέση: 18,5 φορές τη μάζα του άστρου εκφρασμένη σε ηλιακές μάζες.

Αν η πραγματική περίμετρος του άστρου είναι 4 φορές μεγαλύτερη από την κρίσιμη περίμετρο, τότε ο χώρος στη γειτονιά του άστρου θα είναι ελαφρά καμπυλωμένος, ο χρόνος στην επιφάνειά του θα κυλάει 15% πιο αργά απ' ό,τι κυλάει μακριά της και το φως που εκπέμπεται από αυτήν θα είναι μετατοπισμένο προς το ερυθρό επίσης κατά 15%. Βλέπε το επάνω μέρος της εικόνας 3.



Εικόνα 3.

Αν το άστρο έχει περίμετρο μόλις 2 φορές μεγαλύτερη από την κρίσιμη, τότε ο χώρος στη γειτονιά του θα είναι περισσότερο καμπυλωμένος, και ο χρόνος θα κυλάει κατά 41% πιο αργά απ' ό,τι κυλάει μακριά του και το φως που εκπέμπεται από την επιφάνειά του θα είναι μετατοπισμένο προς το ερυθρό κατά 41%. Βλέπε μεσαίο τμήμα της εικόνας 3.

Αυτές οι προβλέψεις φαίνονταν λογικές και γίνονταν αποδεκτές. Εκείνο που δεν φαινόταν λογικό και άργησε να γίνει αποδεκτό ήταν η πρόβλεψη για ένα άστρο με περίμετρο ακριβώς ίση με την κρίσιμη. Ο χώρος στη γειτονιά του θα ήταν έντονα στρεβλωμένος και η διαστολή του χρόνου στην επιφάνειά του θα γινόταν άπειρη. Ο χρόνος δηλαδή σε μια τέτοια επιφάνεια δεν κυλάει καθόλου, "παγώνει".

Αντίστοιχα το φως, ανεξάρτητα από το χρώμα που έχει όταν ξεκινάει το ταξίδι του από την επιφάνεια του άστρου, μετατοπίζεται πέρα από το ερυθρό και το υπέρυθρο, πέρα από τα ραδιοφωνικά μήκη κύματος, ώσπου το μήκος κύματός του να απειρισθεί, ώσπου δηλαδή να εξαφανιστεί. Κάτω τμήμα της εικόνας 3.

Σύμφωνα με τη σύγχρονη ορολογία λέμε ότι η επιφάνεια του άστρου βρίσκεται ακριβώς στον οριζοντα γεγονότων μιας μαύρης τρύπας.

Μ' αυτά τα επιχειρήματα εξηγούμε σήμερα γιατί το φως δεν μπορεί να εγκαταλείψει μια μαύρη τρύπα και να φτάσει στη Γη.

Δεν είναι η βαρυτική έλξη επί των φωτονίων που επιβραδύνει το φως, σιγά σιγά το

σταματά και δεν το αφήνει να εγκαταλείψει τη μαύρη τρύπα, όπως πίστευαν οι Laplace και John Michell κατά τον 18ο αιώνα.

Το φως πρέπει πάντα να έχει τη σταθερή ταχύτητα των 300.000 km/sec.

Άλλωστε αν το φως επιβραδυνόταν σταδιακά από την πανίσχυρη βαρύτητα μιας μαύρης τρύπας μέχρι να σταματήσει, τότε μέχρι να συμβεί αυτό, η μαύρη τρύπα θα ήταν ορατή από παρατηρητές που βρίσκονται σε κάποια κοντινή απόσταση από αυτήν.

**Αναφορά:** Για μια εξαιρετική αναφορά στα ζητήματα των στρεβλώσεων του χωροχρόνου, δείτε το βιβλίο του Kip S. Thorne "Μαύρες τρύπες και στρεβλώσεις του χρόνου". Εκδόσεις Κάτοπτρο.