

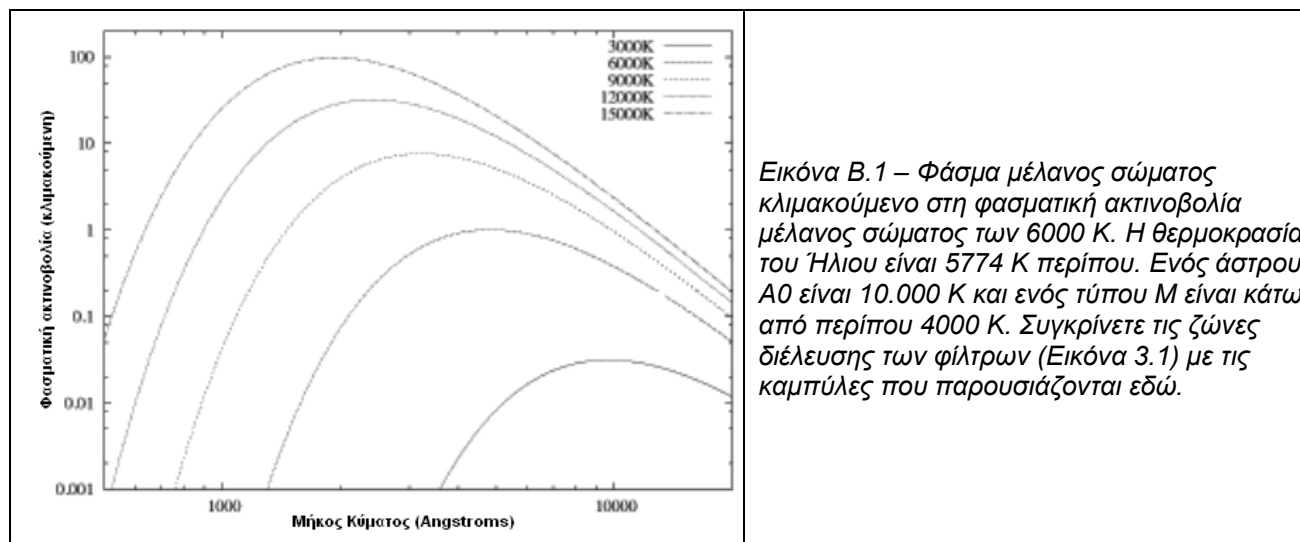
Παράρτημα Β: Γιατί και πώς ακτινοβολούν οι αστέρες

Τόσο η ποσότητα του φωτός που παράγεται όσο και το φάσμα μήκους κύματος του φωτός που ένα εκπέμπει αντικείμενο όπως ένας αστέρας, θα εξαρτηθεί από τις φυσικές ιδιότητες του τι εκπέμπει το φως. Το φάσμα του αστρικού φωτός είναι γενικά πολύ περίπλοκο σε προσεκτική εξέταση, αλλά η φυσική πίσω από αυτό μπορεί να γενικευθεί σε δύο διαδικασίες: Εκπομπή συνεχούς, και γραμμές εκπομπής και απορρόφησης.

Εκπομπή συνεχούς είναι οποιαδήποτε φυσική διαδικασία εκπέμπει φωτόνια σε ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών μηκών κύματος. Ως παράδειγμα, σκεφτείτε τη φωτεινή δέσμη που βλέπετε όταν κρατάτε ένα πρίσμα στο φως του ήλιου - θα δείτε πολλές ζώνες χρώματος με κόκκινο, πορτοκαλί, κίτρινο, μπλε, λουλακί, και βιολετί. Όλα αυτά τα χρώματα είναι παρόντα στο ηλιακό φως την ίδια στιγμή, αλλά δεν μπορείτε να τα δείτε ξεχωριστά - απλά ο Ήλιος φαίνεται λευκός.

Εκπομπή μέλανος σώματος

Ένα ιδιαίτερο είδος εκπομπής συνεχούς είναι η ακτινοβολία μέλανος σώματος, που εκπέμπεται από όλα τα αντικείμενα - οποιαδήποτε αντικείμενα - με θερμοκρασίες πάνω από το απόλυτο μηδέν. Η ποσότητα του φωτός και η κατανομή μήκους κύματος των φωτονίων στο φάσμα μέλανος σώματος εξαρτάται από μία παράμετρο: τη θερμοκρασία. Τα βασικά πράγματα που πρέπει να θυμάστε είναι ότι αν ένας αστέρας είναι θερμότερος από έναν άλλο: (1) θα εκπέμπει συνολικά περισσότερο φως και (2) το φάσμα του φωτός που εκπέμπει θα έχει περισσότερο φως σε μικρότερα μήκη κύματος. Αν έχετε δύο αστέρες των οποίων τα φυσικά μεγέθη είναι τα ίδια όπως και η απόσταση από εμάς, αλλά το ένα είναι 10.000 K και το άλλο 5.000 K, το πιο θερμό άστρο θα είναι πιο λαμπρό (*περισσότερο φως*) και πιο μπλε (*περισσότερη εκπομπή σε μικρότερα μήκη κύματος*). Έτσι, μπορείτε να χρησιμοποιήσετε το φως των άστρων για να μάθετε τη θερμοκρασία ενός άστρου χωρίς να το αγγίξετε - ένα βολικό τέχνασμα! Οι εξισώσεις που περιγράφουν την ακτινοβολία μέλανος σώματος καταρτίστηκαν από τον Max Planck νωρίς τον 20ο αιώνα και συχνά θα δείτε την ακτινοβολία μέλανος σώματος να αναφέρεται ως *ακτινοβολία Planck*.



Υπάρχουν μερικές έννοιες που σχετίζονται με την ακτινοβολία μέλανος σώματος που είναι πολύ χρήσιμες στην αστροφυσική. Πρώτον, ο νόμος του Wien είναι μια απλή εξίσωση που δίνει το μήκος κύματος στο οποίο ένα μαύρο σώμα εκπέμπει το πιο πολύ φως (δηλαδή στην κορυφή του φάσματος μέλανος σώματος):

$$\lambda_{max} = b / T$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος, το T είναι η θερμοκρασία του μέλανος σώματος, και το b είναι μια σταθερά (γνωστή ως *σταθερά μετατόπισης του Wien*). Αυτή εξάγεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση του μέλανος σώματος και προσδιορίζοντας πού έχει μέγιστο η καμπύλη: καθορίζοντας τη θερμοκρασία και το μήκος κύματος στο οποίο η παράγωγος είναι μηδέν. Αυτή είναι μια πραγματικά εύχρηστη εξίσωση, επειδή σας επιτρέπει να υπολογίσετε κατά προσέγγιση τη θερμοκρασία οποιουδήποτε αντικειμένου δρα ως μέλαν σώμα με απλή μέτρηση του σημείου της κορυφής του φάσματός του. Πολλά άστρα μοιάζουν στη συμπεριφορά τους τόσο πολύ με μέλανα σώματα, που είναι εύκολο να γίνει αυτή η μέτρηση. Εκεί που αποτυγχάνει είναι για τους αστέρες που έχουν τόσο ισχυρή ατομική ή μοριακή απορρόφηση, ώστε τα οπτικά τους φάσματα δεν ταιριάζουν πολύ καλά με μέλαν σώμα. (Αυτό συμβαίνει συχνά για τα άστρα τύπου M των οποίων οι αιχμές του φάσματος βρίσκονται ούτως ή άλλως στο εγγύς υπέρυθρο).

Μια άλλη σχέση είναι ο νόμος Stefan-Boltzmann, ο οποίος παρέχει μια απλή σχέση μεταξύ της ροής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας από την επιφάνεια του μέλανος σώματος και της θερμοκρασίας του:

$$f_{bol} = \sigma T^4$$

όπου f_{bol} είναι η συνολική ροή ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας, T είναι η θερμοκρασία, και σ είναι μια σταθερά (η σταθερά Stefan-Boltzmann). Όσο θερμότερο γίνεται ένα μέλαν σώμα, τόσο πιο περισσότερη συνολική ενέργεια εκπέμπει. Και πάλι, αυτό παράγει μια άλλη αστροφυσικώς ενδιαφέρουσα εφαρμογή. Αν είστε σε θέση να εκτιμήσετε την πραγματική θερμοκρασία ενός αστέρα με κάποιο τρόπο (φωτομετρικά ή φασματοσκοπικά) η συνολική λαμπρότητα (το φως που εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις) από ένα μέλαν σώμα είναι απλά η ποσότητα f_{bol} επί το συνολικό εμβαδόν επιφάνειας: $4\pi R^2$. Συνδυάζοντας αυτά τα δύο πράγματα, μπορείτε να πάρετε την ενδιαφέρουσα εξίσωση

$$L_{bol} = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

Υπάρχουν μερικές δυνητικά ενδιαφέρουσες ποσότητες εκεί, δηλαδή η φωτεινότητα (το οποίο μπορεί να συνδεθεί με την απόσταση από το αστέρι) και η ακτίνα του άστρου. Αυτό είναι αστροφυσικώς σημαντικό: η φωτεινότητα ενός άστρου είναι ανάλογη με την πραγματική θερμοκρασία και την ακτίνα του. Οι φασματικοί τύποι περιλαμβάνουν επίσης κλάσεις λαμπρότητας από νάνους έως υπεργίγαντες. Ένας αστέρας μπορεί να έχει πραγματική θερμοκρασία 4000 K, αλλά να υπάρχει μια τεράστια διαφορά στη λαμπρότητα ανάλογα με το αν είναι ότι νάνος αστέρας ή υπεργίγαντας.

Γραμμές εκπομπής και απορροφήσεως

Η δεύτερη διαδικασία, οι γραμμές εκπομπής και απορρόφησης, είναι δύο φαινόμενα που προκαλούνται από την ίδια φυσική διαδικασία - την εκπομπή ή απορρόφηση των μεμονωμένων φωτονίων από άτομα. Τα άτομα αποτελούνται από πυρήνες (πρωτόνια και νετρόνια), που περιβάλλονται από ηλεκτρόνια σε πολύ συγκεκριμένες τροχιές. Οι τροχιές αυτών των ηλεκτρονίων αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες ενεργειακές στάθμες. Εάν ένα ηλεκτρόνιο μεταπέσει από ένα υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο σε ένα χαμηλότερο, θα απελευθερώσει την προκύπτουσα διαφορά ενέργειας ως ένα φωτόνιο με εκείνη την ενέργεια. Επειδή το μήκος κύματος αντιστοιχεί σε ενέργεια, οι μεταβάσεις ηλεκτρονίων αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα μήκη κύματος του φωτός. Αυτά τα μήκη κύματος - ή συνδυασμοί μηκών κύματος - είναι μοναδικά σε κάθε ατομικό είδος. Εάν έχετε ένα δείγμα αερίου υδρογόνου και το διεγείρετε (ας πούμε σε ένα σωλήνα φθορισμού), θα εκπέμψει φως σε διάφορα διακριτά μήκη κύματος που αντιστοιχούν στα επίπεδα ενέργειας του ηλεκτρονίου ενός ατόμου υδρογόνου. Παρομοίως, αν έχετε δείγμα αζώτου, νατρίου, ή αερίου νέον (όλα κοινά σε λαμπτήρες φθορισμού) θα παρουσιάσουν διαφορετικά φάσματα. (Αυτός είναι ο λόγος που οι "πινακίδες νέον" έχουν διαφορετικά χρώματα - χρησιμοποιούν διαφορετικά αέρια).

Το αντίστροφο της εκπομπής είναι η απορρόφηση: αν έχετε ένα φωτόνιο μήκους κύματος κατάλληλου να διεγείρει ένα άτομο που έχει τη δυνατότητα μετάβασης ηλεκτρονίων με τη σωστή ποσότητα ενέργειας, το άτομο θα απορροφήσει το φωτόνιο. Εάν έχετε μια πηγή εκπομπής συνεχούς (όπως η φωτόσφαιρα του αστεριού) μαζί με κάποιο αέριο που μπορεί να απορροφήσει την ενέργεια (όπως υδρογόνο, ασβέστιο, σίδηρος, ή άλλα στοιχεία στην ατμόσφαιρα ενός άστρου), το φάσμα του θα μοιάζει με ενός μέλανος σώματος αλλά με κάποια μήκη κύματος ασθενή ή απόντα. Έτσι, όταν παίρνετε φάσμα ενός άστρου, θα δείτε κυρίως ένα συνεχές φως, αλλά με σκοτεινές ζώνες που εμφανίζονται κατά μήκος του άξονα της διασποράς. Η ποσότητα απορρόφησης που βλέπετε εξαρτάται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων της αφθονίας των διαφόρων ατομικών και μοριακών συστατικών και της θερμοκρασίας του άστρου. Οι αστέρες τύπου A για παράδειγμα, ορίζονται ως έχοντες τις ισχυρότερες γραμμές απορρόφησης του υδρογόνου στα φάσματά τους. Άλλο παράδειγμα, μοριακής απορρόφησης αφορά ψυχρούς αστέρες τύπου-M, με το είδος της απορρόφησης που βλέπετε να εξαρτάται από το αν είναι πλούσιοι σε οξυγόνο ή σε άνθρακα.

Η μελέτη της ακτινοβολίας και της μεταφοράς ακτινοβολίας είναι πολύ πλούσιο θέμα. Πολλά από αυτά που συζητήθηκαν παραπάνω τέθηκαν ακόμη και πριν από τη χρυσή εποχή της κβαντικής μηχανικής, από τον φυσικό του 19ου αιώνα Gustav Kirchhoff, και συνοψίζονται από τους τρεις νόμους της ακτινοβολίας Kirchhoff:

- 1) τα θερμά, στερεά (ή οπτικώς παχέα) αντικείμενα εκπέμπουν συνεχές φάσμα.
- 2) Ένα θερμό, οπτικώς λεπτό αέριο εκπέμπει φως σε διακριτά μήκη κύματος, χαρακτηριστικά της χημικής σύνθεσης του αερίου.
- 3) Ένα συνεχές φάσμα που διέρχεται από ένα ψυχρό, οπτικώς λεπτό αέριο, θα δείξει γραμμές απορρόφησης χαρακτηριστικές της χημικής σύνθεσης του αερίου (και σε ταυτόσημα μήκη κύματος με τις γραμμές εκπομπής που θα εμφανίζονταν εάν το αέριο ήταν θερμό).

Ο Kirchhoff περιέγραψε αυτούς τους νόμους κατά τον 19ο αιώνα, πριν γίνει κατανοητή η μηχανική της κβαντικής και ατομικής φυσικής. Για πολλές όμως περιπτώσεις που παρουσιάζουν ενδιαφέρον στην αστρονομία μεταβλητών αστερών, οι κανόνες αυτοί περιγράφουν σε γενικές γραμμές ό, τι θα δείτε, ενώ τα μαθηματικά μοντέλα για το πώς δημιουργείται το φως και πώς διαδίδεται σε ένα φυσικό σύστημα έχουν τις ρίζες τους στους νόμους του Kirchhoff.

Σ'αυτό το εγχειρίδιο δεν θα καλύψουμε τη φασματική ανάλυση, αλλά είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν παρατηρήσεις και μετρήσεις των ισχυρών φασματικών γραμμών σε ένα αστέρα για να καταλάβουμε από τι είναι φτιαγμένος. Η μέτρηση των ατομικών γραμμών στο εργαστήριο ήταν και εξακολουθεί να είναι ένα σημαντικό πεδίο της εργαστηριακής αστροφυσικής. Οι γραμμές απορρόφησης και εκπομπής θα αλλάζουν την εμφάνισή τους με ένα περίπλοκο τρόπο που εξαρτάται από τη σχετική αφθονία στο πλάσμα, τη θερμοκρασία (ή κατανομή θερμοκρασίας όταν κοιτάμε μέσα από ένα λεπτό αέριο) και πίεσης. Ορισμένες γραμμές και ομάδες γραμμών είναι τόσο ισχυρές και εμφανείς ώστε να χρησιμεύουν ως δείκτες της συνολικής «μεταλλικότητας» (δηλαδή της παρουσίας σε αφθονία στοιχείων εκτός από υδρογόνο και ήλιο). Σε μερικές περιπτώσεις, μπορεί να είναι τόσο ισχυρές ώστε να ανιχνεύονται σε φως ευρείας ζώνης κι έτσι να καταγράφονται με φωτομετρία φίλτρων παρά με φασματοσκοπία.

Άλλες διαδικασίες

Υπάρχουν και άλλες πηγές ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένων μαγνητικών πεδίων (ιδιαίτερα σημαντικό σε ενεργούς αστέρες που παράγουν ακτίνες X), πυρηνικές αντιδράσεις, και ραδιενεργό διάσπαση (η οποία τροφοδοτεί με ενέργεια το εσωτερικό των άστρων και είναι επίσης υπεύθυνη για την ενέργεια που πυροδοτεί τους υπερκαινοφανείς και την εξέλιξη της ακτινοβολίας τους). Πολλοί μεταβλητοί αστέρες, θα έχουν πολλαπλές πηγές ακτινοβολίας και απορρόφησης. Για παράδειγμα, τα άστρα UV Κήτους είναι χαμηλής μάζας, συνήθως πολύ ψυχροί, νεαροί νάνοι τύπου M. Αυτά τα αντικείμενα είναι γενικά πολύ αμυδρά επειδή οι χαμηλές θερμοκρασίες τους σημαίνει ότι ακτινοβολούν σχετικά μικρή ποσότητα φωτός, ως επί το πλείστον στο ερυθρό και το υπέρυθρο. Ωστόσο, μπορούν επίσης να εκπέμπουν τεράστιες ποσότητες μπλε, υπεριώδους, ακτίνων X, ακόμη και ακτίνων γάμμα, σε πολύ σύντομες εκρήξεις λόγω φαινομένων μαγνητικής επανασύνδεσης στην ατμόσφαιρά τους, ανάλογη με τις ηλιακές εκλάμψεις στον Ήλιο μας. Αυτά τα αστέρια κανονικά είναι πολύ αμυδρά στο μπλε, αλλά όταν συμβούν μεγάλες εκλάμψεις, θα μπορεί να έχουν τεράστια ένταση στο μπλε φως, αλλά σχετικά μικρή στο ερυθρό. Μια τέτοια έκλαμψη μπορεί να έχει εύρος 3 ή 4 μεγεθών στην περιοχή του B, αλλά πολύ λιγότερο από ένα μέγεθος σε Rc- ή Ic.

Η φυσική της ακτινοβολίας είναι ένα από τα πρώτα μαθήματα που κάνει ένας φοιτητής της αστρονομίας και ενώ δεν είναι απαραίτητο να είστε παρατηρησιακός αστρονόμος, η γνώση των διεργασιών ακτινοβολίας μπορεί να σας δώσουν κάποια εικόνα για το τι παρατηρείτε. Ένα ιδιαίτερα χρήσιμο βιβλίο για το θέμα είναι των George Rybicki Alan Lightman: *Radiative Processes in Astrophysics*. Μια λεπτομερής αναφορά στις φασματικές γραμμές και τα αστρικά φάσματα είναι του David Gray: *The observation and Analysis of Stellar Photospheres*.