

Υδρογόνο

Το **υδρογόνο** (λατινικά: *hydrogenium*, αγγλικά: *hydrogen*) είναι το αμέταλλο χημικό στοιχείο με χημικό σύμβολο **H** και ατομικό αριθμό **1**. Με ατομική μάζα 1,00794(7) amu, το υδρογόνο είναι το ελαφρύτερο χημικό στοιχείο του περιοδικού πίνακα. Η μονοατομική αλλομορφή του (H₁) είναι η πιο άφθονη χημική ουσία στο σύμπαν, του οποίου θεωρείται ότι αποτελεί το 75% της συνολικής βαρυονικής μάζας.^{[1][2]} Τα άστρα και τα υπολείμματα άστρων κύριας ακολουθίας αποτελούνται κυρίως από υδρογόνο σε κατάσταση πλάσματος. Το πιο συνηθισμένο ισότοπο του υδρογόνου είναι το «πρώτιο» (¹H, όπου η ονομασία αυτή χρησιμοποιείται σπάνια) περιέχει μόνο ένα πρωτόνιο και κανένα νετρόνιο, στον πυρήνα του. Η συμπαντική δημιουργία του ατομικού υδρογόνου παρουσιάστηκε για πρώτη φορά κατά τη διάρκεια της εποχής ανασυνδυασμού.

Στις «κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος», δηλαδή σε θερμοκρασία 25°C και υπό πίεση 1 atm, το (χημικά καθαρό) υδρογόνο είναι άχρωμο, άοσμο, άγευστο, μη τοξικό, αμέταλλο και πολύ εύφλεκτο διατομικό αέριο, με μοριακό τύπο H₂. Εφόσον το υδρογόνο γρήγορα σχηματίζει ομοιοπολικές ενώσεις, και μάλιστα με τα περισσότερα αμέταλλα, αλλά και με αρκετά μέταλλα, καθώς και με μεταλλοειδή, το περισσότερο από το υδρογόνο στη Γη υπάρχει σε μοριακές μορφές, όπως η μορφή του νερού ή στη μορφή διαφόρων οργανικών ενώσεων. Το υδρογόνο παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην οξεοβασική χημεία. Σε ιονικές ενώσεις, μπορεί να πάρει αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο, δηλαδή να σχηματίσει «ανιόν υδριδίου» (H⁻), ή θετικό ηλεκτρικό φορτίο, σχηματίζοντας δηλαδή κατιονικά χημικά είδη, όπως το «υδρογονοκατιόν» (H⁺). Το τελευταίο, μπορεί να αναφέρεται (γραπτά) ως «γυμνό» πρωτόνιο, όμως στην πραγματικότητα δεν έχουν βρεθεί ιονικές ενώσεις που να περιέχουν πραγματικά «γυμνό» πρωτόνιο. Ωστόσο, το υδρογόνο μετέχει σε πιο πολύπλοκα υδρογονούχα σύμπλοκα ιόντα, όπως για παράδειγμα το υδροξόνιο (H₃O⁺).

Ως το απλούστερο γνωστό άτομο, το άτομο του υδρογόνου είχε σημαντική θεωρητική εφαρμογή, και χρησιμοποιήθηκε στην ανάπτυξη της ατομικής θεωρίας. Είναι το μόνο ουδέτερο άτομο για το οποίο υπάρχει αναλυτική λύση για την εξίσωση Σρέντιγκερ (*equation Schrödinger*), οπότε η θεωρητική μελέτη του ατόμου του, δηλαδή των ενεργειακών καταστάσεων του και των δυνατοτήτων του για δημιουργία δεσμών, έπαιξε νευραλγικό ρόλο για την ανάπτυξη της Κβαντομηχανικής.

Το στοιχειακό υδρογόνο (γνωστό και ως «διυδρογόνο», H₂) παράχθηκε για πρώτη φορά τεχνητά^[3] στις αρχές του 16^{ου} αιώνα, με ανάμειξη μετάλλων και ισχυρών οξέων.^[4] Τη χρονική περίοδο 1766-1781, ο Χένρι Κάβεντις (*Henry Cavendish*) αναγνώρισε πρώτος ότι το αέριο υδρογόνο είναι μια διακριτή (ξεχωριστή, διαφορετική από τις ήδη γνωστές) χημική ουσία,^[5] και ότι παρήγαγε νερό όταν καιγόταν. Με βάση αυτή τη βασική του ιδιότητα, το ονόμασε «υδρογόνο», συνενώνοντας τις ελληνικές λέξεις «ϋδωρ» και «γεννώ».

Η βιομηχανική του παραγωγή γίνεται κυρίως με επίδραση υδρατμού σε φυσικό αέριο, και λιγότερο συχνά, με την περισσότερο ενεργοβόρα μέθοδο της λεγόμενης «ηλεκτρόλυσης του νερού».^{[6][7]} Το πλεονάζον υδρογόνο που παράγεται, καταναλώνεται (συνήθως) σε κοντινή απόσταση. Οι δυο μεγαλύτερες (βιομηχανικές) καταναλώσεις του αφορούν την κατεργασία (συγκεκριμένα υδροπυρόλυση) ορυκτών καυσίμων και την παραγωγή αμμωνίας, την τελευταία κυρίως για τη βιομηχανία παραγωγής λιπασμάτων.

Επίσης, το υδρογόνο είναι μια πρόκληση για τη μεταλλουργία, αφού (εκτός άλλων προβλημάτων) μπορεί να διαπύδσει πολλά μέταλλα.^{[8][9]} Το γεγονός αυτό καθιστά περίπλοκη την ορθή σχεδίαση και κατασκευή των σωλήνων μεταφοράς του, καθώς και των δοχείων αποθήκευσής του.^{[9][10]}

Υδρογόνο	
- ← Υδρογόνο → Ήλιο	
	Περιοδικός Πίνακας
1: Hydrogen	1
	
Το άτομο του Υδρογόνου	
	
Αέριο υδρογόνο	
Ιστορία	
Ταυτότητα του στοιχείου	
Όνομα, σύμβολο	Υδρογόνο (H)
Ατομικός αριθμός (Z)	1
Κατηγορία	αμέταλλα
ομάδα, περίοδος, τομέας	1, 1, s
Σχετική ατομική μάζα (A _r)	1,00794
Ηλεκτρονική διαμόρφωση	1s
Ατομικές ιδιότητες	
Ατομική ακτίνα	25 (53,5) pm
Ομοιοπολική ακτίνα	31,(5) pm
Ακτίνα van der Waals	120 pm
Ηλεκτραρνητικότητα	2,20 (Κλίμακα Pauling)
Κυριότεροι αριθμοί οξείδωσης	0, ±1
Ενέργειες ιονισμού	1η:1312.0 kJ·mol ⁻¹
Φυσικά χαρακτηριστικά	
Κρυσταλλικό σύστημα	εξαγωνικό
Σημείο τήξης	-259,14(°C) (14,02 K)
Σημείο βρασμού	-252,87 °C (20,29 K)

Ιδιότητες

Καύση



Ένας από τους κύριους κινητήρες διαστημικού λεωφορείου καίγοντας μείγμα υδρογόνου και οξυγόνου παράγει μια σχεδόν αόρατη γαλάζια φλόγα σε πλήρη ώθηση

Το αέριο υδρογόνο («διυδρογόνο» ή «μοριακό υδρογόνο»)^[11] είναι εξαιρετικά εύφλεκτο και καίγεται στον αέρα σε ένα πολύ μεγάλο εύρος συγκέντρωσης, συγκεκριμένα 4 - 75% κατ' όγκο.^[12] Η ενθαλπία της καύσης του υδρογόνου είναι -286 kJ/mole:



Υπάρχουν εκρηκτικά μείγματα του υδρογόνου επίσης με τον αέρα και με το χλώριο σε εύρος συγκεντρώσεων 4-74% και 5–95% κατ' όγκο, αντίστοιχα. Τα μείγματα μπορούν να αναφλεγούν με σπινθήρα, με θέρμανση ή με ηλιακό φως. Η θερμοκρασία αυτοανάφλεξης του υδρογόνου στον αέρα είναι 500 °C.^[13] Οι φλόγες καθαρού υδρογόνου και καθαρού οξυγόνου εκλύουν υπεριώδες φως, οπότε με μείγμα πλούσιο σε οξυγόνο είναι σχεδόν αόρατες με γυμνό μάτι, όπως φαίνεται καθαρά από το θαμπό νέφος της εξάτμισης των

κύριων κινητήρων ενός διαστημικού λεωφορείου, ιδιαίτερα σε σύγκριση με το πολύ ορατό αντίστοιχο νέφος των διπλανών προωθητήρων στερεών καυσίμων. Η ανίχνευση τυχόν διαρροής υδρογόνου μπορεί να απαιτεί τη χρήση ανιχνευτή φλόγας. Τέτοιες διαρροές μπορεί να είναι πολύ επικίνδυνες. Ένα διάσημο παράδειγμα ήταν η καταστροφή του αεροπλοίου Χίντενμπουργκ, στο οποίο οι φλόγες έγιναν ορατές μόνο αφού αναφλέχθηκαν και άλλα καύσιμα υλικά, από το κέλυφος του σκάφους, που έδιναν ορατή φλόγα^[14] Οι φλόγες υδρογόνου υπό άλλες συνθήκες είναι γαλάζιες, θυμίζοντας τις φλόγες φυσικού αερίου.^[15]

Το υδρογόνο αντιδρά με κάθε οξειδωτικό στοιχείο. Αντιδρά αυθόρμητα και βίαια σε θερμοκρασία δωματίου με το χλώριο και το φθόριο, σχηματίζοντας τα αντίστοιχα υδραλογόνα, δηλαδή υδροχλώριο και υδροφθόριο, αντιστοίχως, που επιπλέον είναι επίσης δυνάμει επικίνδυνα οξέα.^[16]

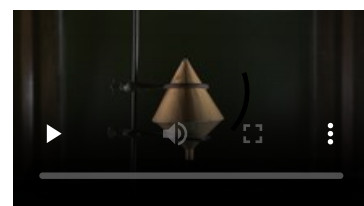
Ηλεκτρονιακά ενεργειακά επίπεδα

Το βασικό ενεργειακό επίπεδο του ηλεκτρονίου σε ένα άτομο υδρογόνου είναι -13,6 eV, που είναι ισοδύναμο με ένα φωτόνιο υπεριώδους ακτινοβολίας με μήκος κύματος γύρω στα 92 νανόμετρα.^[17]

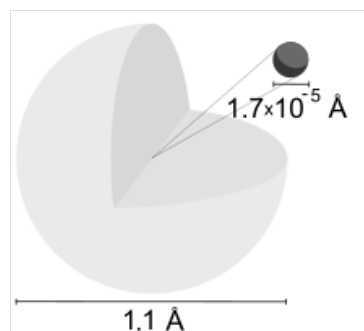
Τα ενεργειακά επίπεδα του ηλεκτρονίου του υδρογόνου μπορούν να υπολογιστούν με σχετική ακρίβεια χρησιμοποιώντας το ατομικό πρότυπο του Μπορ για το άτομο του υδρογόνου, που αντιλαμβάνεται εννοιολογικά την περιφορά του ηλεκτρονίου γύρω από το πρωτόνιο σε αναλογία με την περιφορά της Γης γύρω από τον Ήλιο. Ωστόσο, η ηλεκτρομαγνητική δύναμη έλκει τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια μεταξύ τους, ενώ οι πλανήτες και τα άλλα ουράνια σώματα έλκονται μεταξύ τους με τη δύναμη της βαρύτητας. Λόγω της διακριτοποίησης της τροφορμής, ως υπόθεση με βάση τις αρχές της κβαντομηχανικής από τον Νιλς Μπορ (Niels Bohr), το ηλεκτρόνιο στο ατομικό πρότυπο του Bohr μπορεί να καταλάβει μόνο ορισμένες επιτρεπόμενες αποστάσεις από το πρωτόνιο, και ως εκ τούτου επιτρέπονται μόνο ορισμένα ενεργειακά επίπεδα.^[18]

Μια πιο ακριβής περιγραφή του ατόμου του υδρογόνου ήρθε με τη χρήση καθαρά κβαντομηχανικής μεθόδου, που χρησιμοποιεί την εξίσωση Σρέντινγκερ (*Schrödinger equation*), την εξίσωση Ντιράκ (*Dirac equation*) ή ακόμη και το ολοκλήρωμα δρόμου του Φάινμαν (*Feynman path integral formulation*) για να υπολογιστεί η πυκνότητα πιθανότητας του ηλεκτρονίου γύρω από το πρωτόνιο.^[19] Οι πιο πολύπλοκες μέθοδοι επιτρέπουν τον υπολογισμό και της μικρής επίδρασης της ειδικής σχετικότητας και της πόλωσης του κενού. Στη κβαντομηχανική μέθοδο, η βασική ενεργειακή στάθμη του ηλεκτρονίου του ατόμου υδρογόνου δεν έχει καθόλου τροφορμή, μια ιδιαίτερη επισήμανση για το κατά πόσο διαφέρει στην πραγματικότητα η περίπτωση της πλανητικής περιφοράς σε σύγκριση με την κίνηση του ηλεκτρονίου.

Τριπλό σημείο	-259,36 °C (13,8 K), 7,042 kPa
Κρίσιμο σημείο	-240,19 °C (32,97 K), 1,293 MPa
Πυκνότητα	0,08988 kg/m ³
Ενθαλπία τήξης	0,117 kJ/mol
Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα	4·10 ⁻⁴ μS
Ταχύτητα του ήχου	1310 m/s
Η κατάσταση αναφοράς είναι η πρότυπη κατάσταση (25°C, 1 Atm) εκτός αν σημειώνεται διαφορετικά	



Έκρηξη μείγματος υδρογόνου - αέρα.

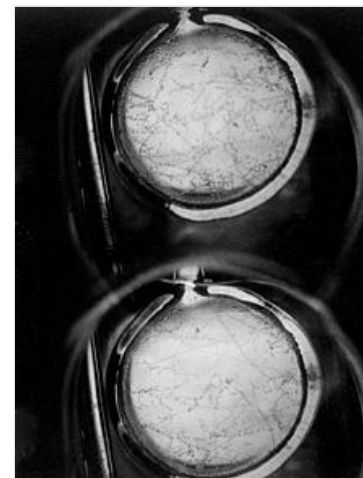


Περιγραφή του ατόμου του υδρογόνου με βάση το διπλάσιο περίπου της ακτίνας Bohr

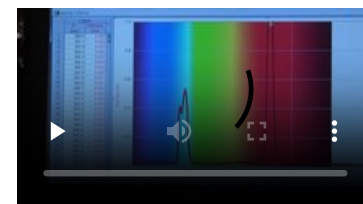
Στοιχειακές μοριακές αλλομορφές

Υπάρχουν δυο διαφορετικές ισομερείς αλλομορφές των διατομικών μορίων του υδρογόνου, που διαφέρουν στη σχετική περιστροφή των πυρήνων τους.^[20] Στην αλλομορφή του «ορθοϋδρογόνου», οι περιστροφές των δυο πρωτονίων (ένα για κάθε άτομο υδρογόνου) είναι παράλληλες και σχηματίζουν μια «τριπλή» κατάσταση με μοριακό κβαντικό μαγνητικό αριθμό περιστροφής 1 ($= \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$). Στη δε αλλομορφή του «παραϋδρογόνου», οι περιστροφές των δυο πρωτονίων του μορίου είναι αντιπαράλληλες και σχηματίζουν μια «απλή» κατάσταση με μοριακό κβαντικό μαγνητικό αριθμό περιστροφής 0 ($= \frac{1}{2} - \frac{1}{2}$). Στις κανονικές συνθήκες, το αέριο υδρογόνο περιέχει περίπου 25% παραϋδρογόνο και 75% ορθοϋδρογόνο, μια αναλογία που είναι επίσης γνωστή ως «κανονική μορφή».^[21] Η σταθερά ισορροπίας του ορθοϋδρογόνου προς παραϋδρογόνο εξαρτάται από τη θερμοκρασία, επειδή η αλλομορφή του ορθοϋδρογόνου είναι μια διεγερμένη μορφή, με υψηλότερη ενέργεια από την αλλομορφή του παραϋδρογόνου. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, η σταθερά ισορροπίας διαφέρει σημαντικά από την κανονική μορφή, εξαιτίας των διαφορών στις θερμοχωρητικότητες περιστροφής.^[22] Η ορθο-/παρα- διάκριση επίσης υπάρχει και σε άλλα υδρογονούχα μόρια ή χαρακτηριστικές ομάδες, όπως στο νερό και στο μεθυλένιο, αλλά έχουν μικρή σημαντικότητα στις θερμικές τους ιδιότητες.^[23]

Η καταλύομενη αλληλομετατροπή ανάμεσα στις δύο αλλομορφές του διυδρογόνου αυξάνει την αναλογία του ορθοϋδρογόνου με την αύξηση της θερμοκρασίας. Έτσι το γρήγορα συμπυκνωμένο υδρογόνο περιέχει μεγάλες ποσότητες του υψηλής ενέργειας ορθοϋδρογόνου, που μετατρέπεται πολύ αργά σε παραϋδρογόνο.^[24] Η αναλογία ορθο/παρα σε συμπυκνωμένο υδρογόνο είναι σημαντική για την παραγωγή και αποθήκευση του υγρού υδρογόνου: Η μετατροπή του ορθοϋδρογόνου σε παραϋδρογόνο είναι μια εξώθερμη διεργασία και παράγει αρκετή θερμότητα για να εξαερωθεί κάποια ποσότητα υγρού υδρογόνου, οδηγώντας σε μείωση του υγροποιημένου υλικού. Καταλύτες για την ορθο/παρα μετατροπή, όπως το τριοξείδιο του σιδήρου, ο ενεργός άνθρακας και η λευκοχρυσούχα άσβεστος, μέταλλα σπάνιων γαιών, ενώσεις του ουρανίου, τριοξείδιο του χρωμίου και κάποιες ενώσεις του νικελίου, χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της ψύξης του υδρογόνου.^[25]



Τα πρώτα ίχνη παρατηρήθηκαν σε υγρό υδρογόνο (σε θάλαμο φουσαλίδων) στο Bevatron. Δύο έντονοι κύκλοι πάνω σε σκούρο υπόβαθρο, που περιέχουν πολλές λεπτές γραμμές στο εσωτερικό τους



Δοκιμή φάσματος υδρογόνου

Φάσεις του υδρογόνου

1. Συμπιεσμένο υδρογόνο
2. Υγρό υδρογόνο
3. Ημιστερεό υδρογόνο
4. Στερεό υδρογόνο
5. Μεταλλικό υδρογόνο

Ενώσεις του υδρογόνου

Ομοιοπολικές (ανόργανες και οργανικές) ενώσεις

Αν και το διυδρογόνο (H_2) δεν είναι και πολύ δραστικό στις κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος, σχηματίζει ενώσεις με τα περισσότερα χημικά στοιχεία. Το υδρογόνο μπορεί να σχηματίσει ενώσεις με στοιχεία πιο ηλεκτραρνητικά από το ίδιο, όπως τα αλογόνα ή το οξυγόνο. Σε αυτές τις ενώσεις το υδρογόνο έχει μερικό (στατιστικό) θετικό φορτίο.^[26] Όταν ενωθεί με το φθόριο, το οξυγόνο ή το άζωτο, το υδρογόνο να σχηματίζει επίσης μέτριας ισχύος μη ομοιοπολικούς δεσμούς, που ονομάζονται δεσμοί υδρογόνου, που είναι ζωτικής σημασίας για τη σταθερότητα και (τη λειτουργικότητα) της δομής πολλών βιολογικών μορίων.^{[27][28]} Το υδρογόνο επίσης σχηματίζει ενώσεις και με λιγότερο ηλεκτραρνητικά από το ίδιο στοιχεία, όπως τα μέταλλα και τα μεταλλοειδή, στα οποία (όταν σχηματίζει με αυτά ομοιοπολικούς δεσμούς) έχει μερικό αρνητικό φορτίο. Αυτές οι ενώσεις είναι συχνά γνωστές ως υδρίδια.^[29]

Το υδρογόνο σχηματίζει ένα μεγάλο αριθμό ενώσεων μόνο με τον άνθρακα, που ονομάζονται υδρογονάνθρακες, αλλά και έναν ακόμη μεγαλύτερο αριθμό ενώσεων στα οποία συμμετέχουν και ετεροάτομα. Εξαιτίας της μεγάλης συσχέτισης αυτών των ενώσεων με τα ζωντανά πλάσματα ονομάστηκαν οργανικές ενώσεις.^[30] Η μελέτη των ιδιοτήτων (των οργανικών ενώσεων) είναι το κύριο πεδίο έρευνας της οργανικής χημείας.^[31] Ειδικότερα, η μελέτη των ενώσεων που σχετίζονται άμεσα με τους ζωντανούς

οργανισμούς είναι γνωστή ως βιοχημεία.^[32] Σύμφωνα με κάποιους ορισμούς διαχωρισμού των οργανικών ενώσεων από τις ανόργανες απαραίτητος για τις οργανικές ενώσεις είναι μόνο ο άνθρακας. Ωστόσο, η πλειοψηφία αυτών (των οργανικών ενώσεων) περιέχει υδρογόνο, γιατί είναι ο δεσμός άνθρακα - υδρογόνου που δίνει σε αυτήν την κατηγορία ενώσεων τα περισσότερα από τα ιδιαίτερα χημικά χαρακτηριστικά της. Ακόμη, ο δεσμός άνθρακα - υδρογόνου είναι απαραίτητος σύμφωνα με κάποιους άλλους ορισμούς της έννοιας «οργανική», στη Χημεία.^[30] Εκατομμύρια υδρογονανθράκων (μόνο) είναι γνωστοί, και συχνά η σύνθεσή τους απαιτεί πολύπλοκες παραγωγικές οδούς, οι οποίες (σχετικά) σπάνια περιλαμβάνουν και αντιδράσεις με στοιχειακό υδρογόνο.

Τα υδρίδια

Οι ενώσεις του υδρογόνου ονομάζονται συχνά υδρίδια. Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται αρκετά χαλαρά. Κανονικά, ο όρος «υδρίδια» υπονοεί (συνήθως) ότι ένα ή περισσότερα άτομα υδρογόνου στην ένωση έχουν απόλυτο ή σχετικό ανιονικό χαρακτήρα, που παριστάνεται με H^- , και χρησιμοποιείται όταν το υδρογόνο σχηματίζει μια ένωση με ένα χημικό στοιχείο πιο ηλεκτροθετικό από το ίδιο. Η ύπαρξη του ανιόντος υδρογόνου προτάθηκε από το Γκίλμπερτ Ν. Λιούις (*Gilbert N. Lewis*) το 1916 για τα «αλατόμορφα» υδρίδια των χημικών στοιχείων των ομάδων 1 και 2 του περιοδικού πίνακα. Αυτό όντως επιδείχθηκε από τον Μόερς (*Moers*) το 1920 με ηλεκτρόλυση τήγματος υδριδίου του λιθίου (LiH). Η ηλεκτρόλυση απέδωσε όντως τη στοιχειομετρικά αναμενόμενη ποσότητα υδρογόνου στην άνοδο.^[33] Ωστόσο, για υδρίδια άλλων ομάδων, δηλαδή εκτός των ομάδων 1 και 2 του περιοδικού συστήματος, ο όρος «ανιόν υδρογόνου» είναι παραπλανητικός, αν λάβουμε υπόψη τη (σχετικά) μικρή ηλεκτραρνητικότητα του υδρογόνου. Μάλιστα υπάρχει και μια εξαίρεση για το πολυμερικό υδρίδιο του βηρυλλίου (BeH_2), παρόλο που το βηρύλλιο ανήκει στην ομάδα 2. Στο λιθιοαργιλιοϋδρίδιο ($LiAlH_4$), υπάρχει το ανιόν $[AlH_4]^-$ που φέρει υδριδικά κέντρα ενωμένα με το Al^{III} .

Παρόλο που τα υδρίδια μπορούν να σχηματιστούν σχεδόν με όλα τα χημικά στοιχεία των «κύριων» ομάδων του περιοδικού συστήματος, ο αριθμός των συνδυασμών των πιθανών ενώσεων ποικίλλει πολύ. Για παράδειγμα, υπάρχουν πάνω από 100 δυαδικά υδρίδια με το βόριο, που μαζί με παράγωγά τους ονομάζονται γενικά βοράνια, αλλά υπάρχει μόνο ένα δυαδικό υδρίδιο του αργιλίου.^[34] Δυαδικό υδρίδιο του ίνδιου δεν έχει ακόμη ταυτοποιηθεί, παρόλο που υπάρχουν μεγαλύτερα σύμπλοκα που εμπεριέχουν ίνδιο και υδρογόνο.^[35]

Στην ανόργανη χημεία, τα ανιόντα υδριδίου μπορούν επίσης να εξυπηρετίσουν ως συναρμωτές γέφυρες μεταξύ δυο μεταλλικών ιόντων σε ενώσεις συναρμογής. Αυτή η λειτουργία είναι ιδιαίτερα συχνή για τα χημικά στοιχεία της 13 ομάδας, ιδιαίτερα για τα βοράνια, για τα σύμπλοκα του αργιλίου και για τα συμπλέγματα καρβοβορανίων.^[36]

<u>H₂</u>																	
<u>LiH</u>	<u>BeH₂</u>											<u>BH₃</u>	<u>CH₄</u>	<u>NH₃</u>	<u>H₂O</u>	<u>HF</u>	
<u>NaH</u>	<u>MgH₂</u>											<u>AlH₃</u>	<u>SiH₄</u>	<u>PH₃</u> <u>PH₅</u>	<u>H₂S</u>	<u>HCl</u>	
<u>KH</u>	<u>CaH₂</u>	<u>ScH₃</u>	<u>TiH₄</u>	<u>VH₃</u>	<u>CrH₂</u>	<u>MnH₂</u>	<u>FeH₂</u>	<u>CoH₂</u>	<u>NiH₂</u>	<u>CuH</u>	<u>ZnH₂</u>	<u>GaH₃</u>	<u>GeH₄</u>	<u>AsH₃</u>	<u>H₂Se</u>	<u>HBr</u>	
<u>RbH</u>		<u>YH₂</u> <u>YH₃</u>	<u>ZrH₂</u>						<u>PdH₂</u>		<u>CdH₂</u>	<u>InH₃</u>	<u>SnH₄</u>	<u>SbH₃</u>	<u>H₂Te</u>	<u>HI</u>	
<u>CsH</u>	<u>BaH₂</u>	<u>LaH₃</u>	<u>HfH₂</u>	<u>TaH₅</u>						<u>AuH₃</u>	<u>HgH</u> <u>HgH₂</u>	<u>TlH</u>	<u>PbH₄</u>	<u>BiH₃</u>	<u>PoH₂</u>	<u>HAt</u>	
↓																	
	<u>CeH₂</u>											<u>ErH₃</u>					
	<u>ThH₂</u>		<u>UH₃</u> <u>UH₄</u>		<u>PuH₂</u> <u>PuH₃</u>												

- Σημείωση: Το παραπάνω πρότυπο των «δυαδικών υδριδίων» παρουσιάζει όλα τα γνωστά δυαδικά υδρίδια χωρίς αλυσοποίηση.

Πρωτόνια και οξέα

Η οξείδωση του υδρογόνου αφαιρεί το ηλεκτρόνιό του και δίνει H^+ , που δεν περιέχει ηλεκτρόνια και ο πυρήνας του αποτελείται συνήθως μόνο από ένα πρωτόνιο. Γι' αυτό συχνά το H^+ ονομάζεται «πρωτόνιο». Αυτό το χημικό είδος είναι κεντρικό στη μελέτη των οξέων. Σύμφωνα με την οξεοβασική θεωρία Μπρόνστιντ-Λόουρυ (*Brønsted–Lowry acid–base theory*), τα οξέα είναι (εξ' ορισμού) δότες πρωτονίων, ενώ οι βάσεις είναι δέκτες πρωτονίων.

Ένα «γυμνό» πρωτόνιο, H^+ , δεν μπορεί να υπάρξει ούτε σε ένα διάλυμα ούτε σε ιονικούς κρυστάλλους, γιατί εξαιτίας της ακαταμάχητης έλξης του για άλλα άτομα και μόρια, παραμένει ενωμένο με κάποια από αυτά. Ωστόσο, ο όρος «πρωτόνιο» πολλές φορές χρησιμοποιείται χαλαρά και μεταφορικά για να αναφερθεί στο θετικά φορτισμένο ή κατιονικό υδρογόνο ενωμένο με άλλα χημικά είδη, και σύμφωνα με αυτήν την πρακτική, γράφεται ως H^+ , χωρίς κανέναν υπαινιγμό ότι τα γυμνά πρωτόνια υπάρχουν (πραγματικά) ελεύθερα ως χημικά είδη.

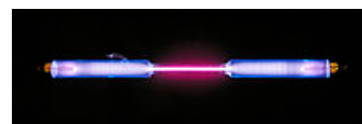
Για να αποφευχθεί κάθε υπαινιγμός ότι υφίσταται «γυμνό» διαλυμένο πρωτόνιο σε διάλυμα, τα όξινα υδατικά διαλύματα θεωρούνται ότι περιέχουν ένα λιγότερο απίθανο εικονικό χημικό είδος, που ονομάζεται «υδροξώνιο» (H_3O^+). Ωστόσο, ακόμη και σε αυτήν την περίπτωση, τέτοια διαλυμένα υδρογονοκατίοντα θεωρούνται ότι πιο ρεαλιστικά και φυσικά οργανώνονται σε συγκροτήματα που αντιστοιχούν σε χημικά είδη πιο κοντά στον τύπο $H_9O_4^+$.^[37]

Άλλα ιόντα οξωνίου βρίσκονται όταν το νερό βρίσκεται σε διάλυμα μαζί με άλλους διαλύτες.^[38]

Παρόλο που θεωρείται εξωτικό στη Γη, ένα από τα πιο συνηθισμένα ιόντα στο σύμπαν είναι το πρωτονιομένο μόριο υδρογόνου, δηλαδή το κατιόν τριυδρογόνου (H_3^+).^[39]

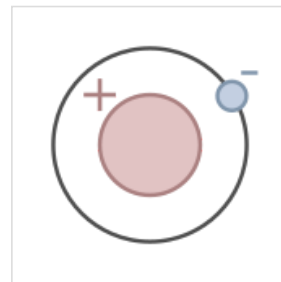
Ισότοπα

Το υδρογόνο έχει τρία (3) φυσικά υπάρχοντα ισότοπα, που παριστάνονται αντίστοιχα με 1H , 2H και 3H . Άλλα τέσσερα (4) πολύ ασταθή ισότοπα, (δηλαδή 4H , 5H , 6H και 7H) έχουν συντεθεί τεχνητά σε εργαστήρια, αλλά δεν παρατηρήθηκαν ποτέ στη φύση.^{[40][41]}



Σωλήνας φασματικής εκκένωσης δευτερίου

1. Το 1H είναι το πιο συνηθισμένο ισότοπο του υδρογόνου, με μια αφθονία πάνω από 99,98%. Επειδή ο πυρήνας αυτού του ισότοπου αποτελείται μόνο από πρωτόνιο, του δίνεται το περιγραφικό αλλά σχετικά σπάνια χρησιμοποιούμενο τυπικό όνομα πρώτιο.^[42]
2. Το 2H ή **D** είναι ένα άλλο σταθερό ισότοπο του υδρογόνου, γνωστό ως δευτέριο, και ο πυρήνας του αποτελείται από ένα (1) πρωτόνιο και ένα (1) νετρόνιο. Ουσιαστικά όλο το δευτέριο στο σύμπαν θεωρείται ότι παράχθηκε κατά τη διάρκεια της Μεγάλης Έκρηξης, και υπάρχει από εκείνη την εποχή. Το δευτέριο δεν είναι ραδιενεργό και δεν παρουσιάζει σημαντική τοξικότητα. Το νερό που είναι εμπλουτισμένο σε μόρια που περιέχουν δευτέριο αντί μόνο πρώτιο λέγεται βαρύ ύδωρ. Το δευτέριο και οι ενώσεις του χρησιμοποιούνται ως ένα μη ραδιενεργός τρόπος επισήμανσης σε χημικά πειράματα και σε διαλύτες για φασματοσκοπία 1H -NMR.^[43] Το βαρύ ύδωρ χρησιμοποιείται ως ένας επιβραδυντής νετρονίων και ως ψυκτικό για πυρηνικούς αντιδραστήρες. Επίσης το δευτέριο αποτελεί εν δυνάμει καύσιμο για οικονομικά βιώσιμη (ελεγχόμενη) πυρηνική σύντηξη.^[44]
3. Το 3H ή **T**, γνωστό ως τρίτιο, περιέχει ένα (1) πρωτόνιο και δύο (2) νετρόνια στον πυρήνα του. Είναι ραδιενεργό, διασπώμενο σε ήλιο-3 μέσω μιας β^- διάσπασης, με μια ημιζωή 12,32 έτη.^[36] Είναι τόσο ραδιενεργό που χρησιμοποιείται ως φωτεινή βαφή, κάνοντάς το χρήσιμο, για παράδειγμα, σε ρολόγια χειρός. Το γυαλί του ρολογιού αποτρέπει τη μικρή ποσότητα της ραδιενέργειας να βγαίνει έξω.^[45] Μικρές ποσότητες τρίτιου υπάρχουν στη φύση, εξαιτίας της επίδρασης της κοσμικής ακτινοβολίας στα ατμοσφαιρικά αέρια. Επίσης μια ποσότητα τρίτιου εκλύθηκε κατά τη διάρκεια των πυρηνικών δοκιμών.^[46] Χρησιμοποιήθηκε σε αντιδράσεις πυρηνικής σύντηξης,^[47] ως ένας ιχνηλάτης στην ισοτοπική γεωχημεία^[48] και σε εξειδικευμένες αυτοτροφοδοτούμενες συσκευές φωτισμού.^[49] Το τρίτιο χρησιμοποιήθηκε επίσης σε χημικά και βιολογικά πειράματα επισήμανσης ως ένας ραδιοεπισημαντής.^[50]



Το «πρώτιο», το πιο συνηθισμένο ισότοπο του υδρογόνου, έχει ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο. Το μοναδικό ανάμεσα σε όλα τα σταθερά ισότοπα όλων των στοιχείων που δεν έχει κανένα νετρόνιο. Σχηματική απεικόνιση ενός θετικού σωματιδίου στο κέντρο και ενός αρνητικού σωματιδίου που περιφέρεται γύρω από το θετικό.

Το υδρογόνο είναι το μόνο χημικό στοιχείο για το οποίο υπάρχουν σήμερα διαφορετικά ονόματα για τα διαφορετικά ισότοπά του. Παλαιότερα, στα αρχικά στάδια της μελέτης της ραδιενέργειας, και σε διάφορα βαριά ραδιενεργά ισότοπα είχαν δοθεί δικά τους ονόματα, αλλά τέτοια ονόματα δεν χρησιμοποιούνται πλέον, παρά μόνο για το δευτέριο και το τρίτιο. Επίσης έχουν και δικά τους χημικά σύμβολα, D για το δευτέριο και T για το τρίτιο, αντί για 2H και 3H , αντίστοιχα, αλλά φυσικά δεν χρησιμοποιήθηκε το σύμβολο P για το πρώτιο, αφού το σύμβολο ήταν ήδη σε χρήση για το στοιχείο φωσφόρος και δεν ήταν διαθέσιμο για το πρώτιο.^[51] Σύμφωνα με την IUPAC επιτρέπεται η χρήση των D και T, αλλά προτιμάται η χρήση των συμβόλων 2H και 3H , αντίστοιχα.^[52]

Ανακάλυψη και χρήση του υδρογόνου

Το 1671, ο Ρόμπερτ Μπόιλ (*Robert Boyle*) το ανακάλυψε εκ νέου και περιέγραψε την αντίδραση ρινισμάτων σιδήρου και διαλυμάτων οξέων, που κατέληγαν στην παραγωγή αέριου υδρογόνου.^{[53][54]}

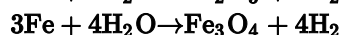
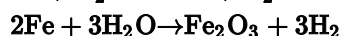
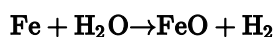
Το 1766, ο Χένρι Κάβεντις (*Henry Cavendish*) ήταν ο πρώτος που αναγνώρισε το παραγόμενο υδρογόνο ως ξεχωριστό χημικό στοιχείο, ονομάζοντας το αέριο που προκύπτει από την αντίδραση μετάλλου - οξέος «εύφλεκτο αέρα». Θεώρησε όμως ότι ο «εύφλεκτος αέρας» ήταν στην πραγματικότητα ταυτόσημο με την υποθετική ουσία που ονομάζονταν τότε «φλόγιστρον»^{[55][56]} και επιπλέον βρήκε το 1781 ότι ο «εύφλεκτος αέρας» παρήγαγε νερό όταν καίγονταν. Συνήθως πιστώνεται την ανακάλυψη του υδρογόνου ως χημικό στοιχείο.^{[57][58]}

Το 1783, ο Αντουάν Λαβουαζιέ ονόμασε το νέο χημικό στοιχείο «υδρογόνο» (από τις ελληνικές λέξεις «ὕδρω» και «γενής»),^[59] όταν αυτός και ο Λαπλάς ανακάλυψαν εκ νέου το εύρημα του Κάβεντις, ότι δηλαδή το υδρογόνο καίγεται σχηματίζοντας νερό.^[58]



Αντουάν Λωράν Λαβουαζιέ

Ο Λαβουαζιέ παρήγαγε υδρογόνο με τα περίφημα πειράματά του στη μάζα που μετατρέπεται με την αντίδραση ατμού με μεταλλικό σίδηρο, με διοχέτευση ροής ατμού μέσα από ένα πυρακτωμένο στη φωτιά σιδερένιο σωλήνα. Η αναερόβια οξείδωση του σιδήρου από τα πρωτόνια του νερού σε υψηλή θερμοκρασία μπορεί να αναπαρασταθεί σχηματικά από τις ακόλουθες στοιχειομετρικές εξισώσεις:



Πολλά μέταλλα, όπως για παράδειγμα το ζirkόνιο, δίνει μια παρόμοια αντίδραση με το νερό, που επίσης οδηγεί στην παραγωγή υδρογόνου.

Το υδρογόνο υγροποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Τζέιμς Ντιούαρ (*James Dewar*), το 1898, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της απότομης εκτόνωσης συμπιεσμένου αερίου. Διατήρησε το υγρό υδρογόνο που παράχθηκε στην ομώνυμη εφεύρεσή του, το δοχείο Ντιούαρ.^[58] Με την ίδια μέθοδο κατόρθωσε να παρασκευάσει στερεό υδρογόνο τον επόμενο χρόνο (1899).^[58] Το δευτέριο ανακαλύφθηκε το Δεκέμβριο του 1931 από τον Χάρολντ Ουρέυ (*Harold Urey*) και το τρίτιο (που είναι τεχνητό) πρωτοπαρασκευάστηκε το 1934, από τους Έρνεστ Ράδερφορντ (*Ernest Rutherford*), Μαρκ Όλιφαντ (*Mark Oliphant*) και Πωλ Χάρτεκ (*Paul Harteck*).^[57] Το βαρύ ύδωρ (D_2O), ανακαλύφθηκε από την ομάδα του Ουρέυ το 1932.^[58] Ο Φράνκνις Ισαάκ ντε Ριβάζ (*François Isaac de Rivaz*) κατασκεύασε τον πρώτο κινητήρα ντε Ριβάζ (*first de Rivaz engine*), τον πρώτο κινητήρα εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούσε μείγμα υδρογόνου και οξυγόνου, το 1806. Ο Έντουαρντ Ντάνιελ Κλαρκ (*Edward Daniel Clarke*) ανακάλυψε τον σωλήνα ανάφλεξης υδρογόνου το 1819. Ο Γιόχαν Γουόλφγκαγκ Ντομπερίνερ (*Johann Wolfgang Döbereiner*) εφηύρε την ομώνυμη λυχνία υδρογόνου το 1823.^[58]

Το πρώτο αερόστατο υδρογόνου εφευρέθηκε από τον Ζακ Σαρλ (*Jacques Charles*) το 1783.^[58] Το υδρογόνο παρείχε την απαιτούμενη άνωση για τα πρώτα αξιόπιστα αεροπορικά ταξίδια μετά από την εφεύρεση, το 1852, του πρώτου αερόπλοιου υδρογόνου από τον Χενρί Γκιφάρντ (*Henri Giffard*).^[58] Ο Γερμανός Κόμης Φέρντιναντ φον Ζέπελιν (*count Ferdinand von Zeppelin*) προώθησε την ιδέα των «σκληρών» αερόπλοιων που ανυψώθηκαν με υδρογόνο και που αργότερα ονομάστηκαν προς τιμήν του Ζέπελιν. Το πρώτο τέτοιο αερόπλοιο πέταξε το 1900.^[58] Η εφεύρεση αυτή εγκαινίασε τις πρώτες τακτικές αερογραμμές που, από το 1910, που άρχισαν, μέχρι την έναρξη του ΑΠΠ, τον Αύγουστο του 1914 είχαν μεταφέρει 35.000 επιβάτες χωρίς κανένα ατύχημα. Κατά τη διάρκεια του πολέμου τα ζέπελιν χρησιμοποιήθηκαν σε αποστολές αναγνώρισης και βομβαρδισμού και με ανύψωση από πλοία του ναυτικού.

Η πρώτη υπερατλαντική πτήση (χωρίς στάσεις) έγινε από το βρετανικό αερόπλοιο R34 το 1919. Οι κανονικές αερογραμμές με αερόπλοια επαναλήφθηκαν τη δεκαετία του 1920 και η ανακάλυψη του ηλίου στις ΗΠΑ, ως μη εύφλεκτο υποσχόταν αυξημένη ασφάλεια, αλλά οι ΗΠΑ αρνήθηκαν να πουλήσουν το νέο αέριο για μια τέτοια χρήση. Γι' αυτό συνεχίστηκε η χρήση υδρογόνου στα αερόπλοια, μέχρι το περίφημο δυστύχημα του αερόπλοιου Hindenburg πάνω από το Νιου Τζέρσεϊ στις 6 Μαΐου του 1937. Το επεισόδιο μεταδόθηκε ζωντανά από το ραδιόφωνο και κινηματογραφήθηκε. Η ανάφλεξη διαρροής υδρογόνου θεωρήθηκε ευρέως ως η αιτία του, αλλά πιο προσεκτικές έρευνες που έγιναν αργότερα έδειξαν πως η αιτία ήταν η ανάφλεξη του υφάσματος με

επικάλυψη αλουμινίου, που χρησίμευε σαν περίβλημα, από στατικό ηλεκτρισμό. Όμως η δυσφήμιση του υδρογόνου ως ανυψωτικού αερίου από το συμβάν είχε γίνει και ήταν καταλυτική και προκάλεσε τη διακοπή της χρήσης αερόπλοιων εις όφελος των βαρύτερων του αέρα αεροπλάνων, που όμως, στην πραγματικότητα ποτέ δεν εγγυήθηκαν τη σχετικά ανώτερη ασφάλεια των αερόπλοιων (έστω και υδρογόνου), που είχαν μόλις ένα δυστύχημα σε 30 χρόνια πτήσεων. Βέβαια, στην επιλογή των αεροπλάνων στις εθνικές και διεθνείς αερογραμμές συνέβαλε και το γεγονός της αυξημένης ταχύτητας που τα τελευταία πέτυχαν καθώς εξελίσσονταν, που ήταν δύσκολο να την παρακολουθήσουν τα αναλογικά πιο ογκώδη αερόπλοια.

Ωστόσο άλλες χρήσεις του υδρογόνου συνέχισαν να εφευρίσκονται και να χρησιμοποιούνται, όπως η πρώτη ψυχόμενη με υδρογόνο στροβιλογεννήτρια το 1937 στο Ντέυτον του Οχάιο, από την Dayton Power & Light Co,^[60] που λόγω της θερμικής αγωγιμότητας του αερίου υδρογόνου είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος στον τομέα ακόμη και στις μέρες μας (2009).

Το 1977 εφευρέθηκε η πρώτη μπαταρία νικελίου - υδρογόνου και χρησιμοποιήθηκε από τον τεχνητό δορυφόρο NTS-2.^[61] Ακολούθησαν σε χρήση της μπαταρίας αυτής στους δορυφόρους ή διαστημόπλοια ISS,^[62] Mars Odyssey,^[63] Mars Global Surveyor^[64] και το διαστημικό τηλεσκόπιο Χαμπλ, στο οποίο τελικά αντικαταστάθηκαν το Μάιο του 2009,^[65] πάνω από 19 χρόνια μετά την εκτόξευσή του και 13 χρόνια μετά το τέλος της διάρκειας της προσχεδιασμένης ζωής των μπαταριών αυτών.^[66]

Ο ρόλος του υδρογόνου στην ανάπτυξη της κβαντικής θεωρίας

Εξαιτίας της σχετικά απλής ατομικής δομής του, που αποτελείται μόνο από ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο, το άτομο του υδρογόνου, μαζί με το φάσμα που εκπέμπεται ή απορροφάται από αυτό, ήταν κεντρικό για την ανάπτυξη της θεωρίας της ατομικής δομής.^[67] Επιπλέον, η συνεπάγουσα σχετική απλότητα του μορίου υδρογόνου (H_2) και ακόμη περισσότερο του κατιόντος διυδρογόνου (H_2^+) επέτρεψε την πληρέστερη κατανόηση της φύσης του χημικού δεσμού, που ακολουθήθηκε σύντομα μετά από την κβαντομηχανική μεταχείριση του ατόμου του υδρογόνου που αναπτύχθηκε κατά τα μέσα της δεκαετίας του 1920.



Χαρακτηριστικές γραμμές φάσματος εκπομπής υδρογόνου στο ορατό - κοντινό υπεριώδες φάσμα. Η προσπάθεια εξήγησής τους οδήγησε στην ανάπτυξη της κβαντικής θεωρίας

Ένα από τα πρώτα κβαντικά φαινόμενα που εξάχθηκαν παρατηρήθηκε (αλλά δεν κατανοήθηκε αμέσως) από τον Μάξγουελ (*James Clerk Maxwell*) και αφορούσε το υδρογόνο, μισό αιώνα πριν ανακαλυφθεί η πλήρης κβαντομηχανική θεωρία. Ο Μάξγουελ παρατήρησε, συγκεκριμένα, ότι η σχετική θερμοχωρητικότητα του διυδρογόνου ανεξήγητα αποκλίνει από εκείνη που αντιστοιχεί σε ένα διατομικό αέριο κάτω από τη θερμοκρασία δωματίου και μάλιστα αρχίζει να αυξανόμενα να εξομαλύνεται με εκείνη ενός μονοατομικού αερίου σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία, αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στα διαστήματα που αφήνουν τα κβαντισμένα επίπεδα περιστροφικής ενέργειας, που είναι σχετικά μεγάλα για το διυδρογόνο, εξαιτίας της σχετικά μικρής μάζας του. Αυτά τα σχετικά μεγάλης απόστασης επίπεδα «απαγορεύουν» την ίση διάχυση της θερμικής ενέργειας στην ενέργεια περιστροφικής κίνησης των μορίων του διυδρογόνου στις χαμηλές θερμοκρασίες. Τα διατομικά αέρια που αποτελούνται από βαρύτερα άτομα δεν έχουν τόσο μεγάλης απόστασης ενεργειακά επίπεδα και «δεν απαγορεύουν» τη διάχυση της θερμικής ενέργειας ώστε να παρατηρηθεί το ίδιο φαινόμενο.^[68]

Φυσική παρουσία

Όπως ανακάλυψε η Σεσίλια Πέιν-Γκαπόσκιν (*Cecilia Payne-Gaposchkin*) το 1925, το υδρογόνο, ως ατομικό υδρογόνο, είναι το πιο άφθονο χημικό στοιχείο στο σύμπαν, του οποίου αποτελεί πάνω από το 75% της μάζας του και πάνω από το 90% του συνολικού αριθμού των ατόμων, αν και η περισσότερη μάζα του σύμπαντος δεν βρίσκεται με τη μορφή της ύλης τύπου χημικών στοιχείων, αλλά μάλλον υποστηρίζεται ότι βρίσκεται σε μη ανιχνευθέντες ακόμη μορφές μάζας, όπως η σκοτεινή ύλη και η σκοτεινή ενέργεια.^[69] Το υδρογόνο βρίσκεται σε μεγάλη αφθονία στα άστρα και στους γιγάντιους αεριώδεις πλανήτες. Τα μοριακά νέφη διυδρογόνου είναι συσχετισμένα με το σχηματισμό νέων άστρων. Το υδρογόνο παίζει ένα ζωτικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας από τα άστρα, μέσω της αντίδρασης πρωτονίου - πρωτονίου και του κύκλου CNO πυρηνική σύντηξη πυρηνικής σύντηξης.^[70]

Σε όλο το σύμπαν, το περισσότερο υδρογόνο βρίσκεται με τη μορφή του ατομικού υδρογόνου και της κατάστασης πλάσματος, του οποίου οι ιδιότητες είναι σημαντικά διαφορετικές από αυτές του μοριακού υδρογόνου (ή διυδρογόνου). Στην κατάσταση πλάσματος τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια δεν βρίσκονται μαζί, με αποτέλεσμα μια πολύ μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα και φωτεινότητα, παράγοντας ουσιαστικά το φως του Ήλιου και των άλλων άστρων. Τα φορτισμένα σωματίδια επηρεάζονται πολύ από μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία. Για παράδειγμα, η αλληλεπίδραση του ηλιακού ανέμου με τη Γήινη μαγνητόσφαιρα δίνει τα

ρεύματα Μπίρκελαντ (*Birkeland currents*) και τα σέλαα. Το υδρογόνο βρίσκεται σε ουδέτερη ατομική μορφή στο διαστρικό ενδιάμεσο. Μεγάλες ποσότητες ουδέτερου υδρογόνου βρέθηκαν στα συστήματα Λύρα α και θεωρείται ότι κυριαρχεί στην κοσμολογική βαρυονική πυκνότητα του σύμπαντος με μια μετατόπιση προς το ερυθρό $z = 4$.^[71]

Κάτω από τις συνηθισμένες στη Γη συνθήκες, το στοιχειακό υδρογόνο βρίσκεται στη μορφή του διατομικού αερίου διυδρογόνου (H_2). Ωστόσο, το υδρογόνο είναι πολύ σπάνιο στην ατμόσφαιρα της Γης (με συγκέντρωση περίπου 1 ppm κατ'όγκο) επειδή το μικρό του βάρος επιτρέπει τη διαφυγή του από τη γήινη βαρύτητα προς το διάστημα πιο εύκολα σε σύγκριση με τα βαρύτερα αέρια. Ωστόσο, το υδρογόνο είναι το τρίτο πιο άφθονο χημικό στοιχείο στην επιφάνεια της Γης,^[72] το περισσότερο με τη μορφή του νερού και των υδρογονανθράκων.^[36] Το υδρογόνο παράγεται από κάποια βακτήρια και άλγη και είναι φυσικό συστατικό των αερίων εντέρου, όπως το μεθάνιο, που είναι μια πηγή υδρογόνου με αυξανούσα σημαντικότητα.^[73]

Μια μορφή που ονομάζεται πρωτονιομένο μοριακό υδρογόνο (H_3^+) είναι ένα από τα πιο άφθονα ιόντα στο σύμπαν και παίζει έναν αξιοσημείωτο ρόλο στη χημεία του διαστρικού ενδιάμεσου.^[74] Το ουδέτερο τριατομικό υδρογόνο (H_3) μπορεί μόνο να υπάρχει σε μια διεγερμένη μορφή και είναι ασταθές.^[75] Σε αντιδιαστολή, το θετικό ιόν μοριακού υδρογόνου (H_2^+) είναι σπάνιο χημικό είδος στο σύμπαν.



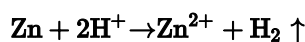
Ο NGC 604, μια γιγαντιαία περιοχή ιονισμένου υδρογόνου στο Γαλαξία του Τριγώνου. Ένα λευκοπράσινο νεφέλωμα που μοιάζει με βαμβάκι σε μαύρο φόντο.

Παραγωγή

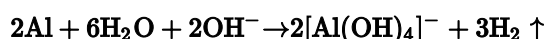
Το υδρογόνο παράγεται σε χημικά και βιολογικά εργαστήρια, συχνά ως ένα παραπροϊόν άλλων αντιδράσεων. Στη βιομηχανία παράγεται (κυρίως) για την υδρογόνωση ακόρεστων ουσιών, και στη φύση παράγεται ως ένα μέσο εξουδετέρωσης αναγόμενων ισοδύναμων σε βιοχημικές αντιδράσεις.

Εργαστηριακή

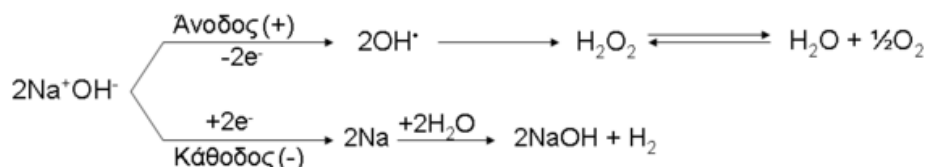
1. Σε χημικά εργαστήρια το υδρογόνο συνήθως παράγεται με αντίδραση διαλυμάτων μη οξειδωτικών οξέων σε κάποια δραστικά μέταλλα όπως ο ψευδάργυρος με τη συσκευή Κιππ (*Kipp's apparatus*):



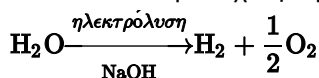
2. Το αργίλιο μπορεί επίσης να παραγάγει υδρογόνο και με επίδρασή του σε βάσεις:



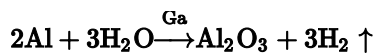
3. Η ηλεκτρόλυση νερού είναι μια άλλη απλή μέθοδος παραγωγής υδρογόνου. Ένα ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής τάσης περνά μέσω αραιού διαλύματος υδροξειδίου του νατρίου, οπότε αέριο οξυγόνο εκλύεται στην άνοδο και αέριο υδρογόνο σχηματίζεται στην κάθοδο. Τυπικά ως κάθοδος χρησιμοποιείται λευκόχρυσος (ή κάποιο άλλο ευγενές μέταλλο), όταν παράγεται υδρογόνο για αποθήκευση. Αν όμως το αέριο υδρογόνο παράγεται για να καεί επιτόπου, το οξυγόνο είναι επίσης επιθυμητό για να βοηθήσει την καύση, οπότε θα πρέπει και τα δυο ηλεκτρόδια να είναι φτιαγμένα από ευγενή μέταλλα, γιατί αν για παράδειγμα χρησιμοποιηθεί σίδηρος στην άνοδο θα οξειδωθεί και θα μειώσει την ποσότητα διαθέσιμου οξυγόνου που δίνεται από την ηλεκτρόλυση. Η θεωρητική μέγιστη απόδοση της ηλεκτρόλυσης (δηλαδή ηλεκτρική αξία του υδρογόνου που παράχθηκε προς ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώθηκε για την παραγωγή του) κυμαίνεται στο εύρος 80-94%:^[76]



- Η συνολική στοιχειομετρική εξίσωση της αντίδρασης εκφράζεται ως ακολούθως:

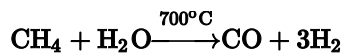


4. Το 2007 ανακαλύφθηκε ότι αν ένα κράμα αργιλίου και γαλλίου σε μορφή πέλλετ προστεθεί σε νερό μπορεί να παραγάγει υδρογόνο. Η διεργασία παράγει επίσης αλουμίνα, αλλά το ακριβό γάλλιο, που χρειάζεται για να παρεμποδίζει τη δημιουργία ενός φλοιού οξειδίου, μένει ανέπαφο και μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί. Αυτή η αντίδραση έχει σημαντικές πιθανές επιπτώσεις σε μια οικονομία του υδρογόνου, καθώς το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί επιτόπου και δεν χρειάζεται να μεταφερθεί.^[77]



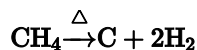
Βιομηχανική

1. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, αλλά οικονομικά η πιο σημαντική διεργασία περιλαμβάνει αφαίρεση υδρογόνου από υδρογονάνθρακες. Το βιομηχανικό υδρογόνο συνήθως παράγεται με αναμόρφωση με ατμό σε φυσικό αέριο.^[78] Σε υψηλές θερμοκρασίες (700 - 1000 °C), ατμός αντιδρά με το μεθάνιο (CH₄, κύριο συστατικό του φυσικού αερίου) και δίνει μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και υδρογόνο:

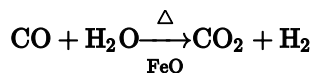


Αυτή η αντίδραση ευνοείται σε χαμηλές πιέσεις, αλλά παρ'όλα αυτά διεξάγεται σε υψηλές πιέσεις, της τάξης των 20 atm. Αυτό συμβαίνει γιατί το υψηλής πίεσης υδρογόνο είναι το πιο αξιοποιήσιμο εμπορικά προϊόν και γιατί τα συστήματα καθαρισμού προσρόφησης ταλάντωσης πίεσης (Pressure Swing Adsorption (PSA) purification systems) λειτουργούν καλύτερα σε υψηλές πιέσεις. Το παραγόμενο μείγμα μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου ονομάζεται αέριο σύνθεσης, γιατί χρησιμοποιείται συχνά απευθείας για την παραγωγή μεθανόλης και άλλων σχετικών ενώσεων. Άλλοι υδρογονάνθρακες εκτός του μεθανίου μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή συνθετικού αερίου, αλλά (πιθανώς) με διαφορετικές αναλογίες προϊόντων.

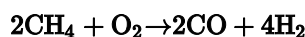
2. Μια από τις πολλές παραλλαγές της παραπάνω μεθόδου είναι ο σχηματισμός κωκ ή γενικότερα άνθρακα αντί μονοξειδίου του άνθρακα:



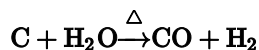
3. Επιπλέον, η αναμόρφωση με ατμό μπορεί να γίνει και στο παραγόμενο μονοξείδιο του άνθρακα, για την παραγωγή επιπλέον υδρογόνου, ιδιαίτερα με οξείδιο του σιδήρου ως καταλύτη. Η αντίδραση αυτή είναι μια συνηθισμένη βιομηχανική πηγή διοξειδίου του άνθρακα:^[78]



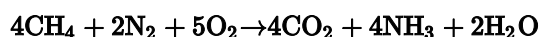
4. Άλλη σημαντική μέθοδος παραγωγής υδρογόνου περιλαμβάνει τη μερική οξυγόνωση υδρογονανθράκων:^[79]



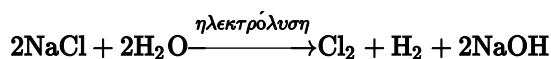
5. Επίσης, μπορεί να γίνει παραγωγή υδρογόνου με αναμόρφωση με ατμό σε γαιάνθρακα:^[78]



6. Τέλος, πολύ συχνά το υδρογόνο παράγεται και καταναλώνεται στην ίδια βιομηχανική διεργασία, χωρίς καν να διαχωριστεί ενδιάμεσα. Για παράδειγμα, στη διεργασία Χάμπερ (Haber process), για την παραγωγή αμμωνίας, το υδρογόνο παράγεται από το φυσικό αέριο και χρησιμοποιείται άμεσα για τη σύνθεση της αμμωνίας:^[80]



7. Τέλος χρησιμοποιείται η ηλεκτρόλυση άλμης, που παράγει βασικά χλώριο, αλλά και υδρογόνο ως παραπροϊόν:^[81]



Θερμοχημική

Υπάρχουν περισσότεροι από 200 θερμοχημικοί κύκλοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διάσπαση του νερού (στα συστατικά του). Ενδεικτικά αναφέρονται τα ακόλουθα παραδείγματα τέτοιων θερμοχημικών κύκλων:

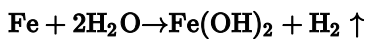
1. Κύκλος οξειδίων του σιδήρου.
2. Κύκλος οξειδίων του δημητρίου.

3. Κύκλος ψευδαργύρου και οξειδίου του.
4. Κύκλος θείου - ιωδίου.
5. Κύκλος χαλκού - χλωρίου.
6. Υβριδικός κύκλος θείου.

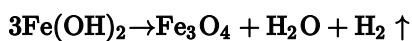
Οι παραπάνω κύκλοι είναι υπό έρευνα και έλεγχο για παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου από το νερό με τη χρήση θερμότητας αντί ηλεκτρισμού.^[82] Ένας αριθμός ερευνητικών εργαστηρίων σε χώρες που συμπεριλαμβάνουν τη Γαλλία, τη Γερμανία, την Ελλάδα, την Ιαπωνία και τις ΗΠΑ, αναπτύσσουν θερμοχημικές μεθόδους για την παραγωγή υδρογόνου από το νερό με χρήση της ηλιακής ενέργειας.^[83]

Αναερόβια διάβρωση

Κάτω από αναερόβιες συνθήκες,^[84] τα κράματα σιδήρου και χάλυβα οξειδώνονται αργά από τα πρωτόνια του νερού, τα οποία κατά συνέπεια ανάγονται σε υδρογόνο. Η αναερόβια διάβρωση του σιδήρου οδηγεί αρχικά στο σχηματισμό υδροξειδίου του σιδήρου και μπορεί να περιγραφεί με την ακόλουθη στοιχειομετρική εξίσωση:



Με τη σειρά του, πάντα κάτω από αναερόβιες συνθήκες, το υδροξείδιο του σιδήρου μπορεί να οξειδωθεί παραπέρα από τα πρωτόνια του νερού, σχηματίζοντας έτσι μαγνητίτη και υδρογόνο. Η διεργασία μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη στοιχειομετρική εξίσωση της αντίδρασης Σχικόρρ (Schikorr reaction):



Ο καλά κρυσταλλωμένος μαγνητίτης (Fe_3O_4) είναι θερμοδυναμικά πιο σταθερός σε σχέση με το υδροξείδιο του σιδήρου.

Αυτή η διεργασία συμβαίνει όταν σίδηρος ή χάλυβας διαβρώνεται αναεροβικά από μη οξυγονούχο υπόγειο νερό και σε αναγωγικά εδάφη κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα.

Σε απουσία ατμοσφαιρικού οξυγόνου, σε βαθιές γεωλογικές συνθήκες που συμβαίνουν μακριά από την ατμόσφαιρα της Γης, το υδρογόνο παράγεται με τη διεργασία ερπετοποίησης (process of serpentinization) από την αερόβια οξείδωση πρωτονίων νερού σε πυριτικό σίδηρο (Fe_2SiO_4), που βρίσκεται στο κρυσταλλικό πλέγμα του φαυαλίτη (Fe_2SiO_4 , το σιδηρούχο μέρος της ολιβίνης). Από την αντίδραση αυτή παράγονται μαγνητίτης (Fe_3O_4), χαλαζίας (SiO_2) και υδρογόνο, σύμφωνα με την ακόλουθη στοιχειομετρική εξίσωση:



Η αντίδραση αυτή μοιάζει πολύ με την παραπάνω αναφερόμενη αντίδραση Σχικόρρ, δηλαδή της αναεροβικής οξείδωσης του υδροξειδίου του σιδήρου με την επαφή του (τελευταίου) με νερό.

Σχηματισμός υδρογόνου σε μετασχηματιστές ισχύος

Από όλα τα παραπροϊόντα αέρια που παράγονται σε μετασχηματιστές ισχύος, το υδρογόνο είναι το πιο συνηθισμένο και παράγεται κάτω από τις περισσότερες σφαλματικές συνθήκες (fault conditions). Έτσι, ο σχηματισμός του υδρογόνου είναι μια πρόωμη ένδειξη σοβαρών προβλημάτων κατά τον «κύκλο ζωής» ενός μετασχηματιστή.^[85]

Εφαρμογές

Κατανάλωση σε διεργασίες

Μεγάλες ποσότητες υδρογόνου χρειάζονται στις πετροχημικές και χημικές βιομηχανίες. Η μεγαλύτερη (σε κατανάλωση) εφαρμογή του υδρογόνου είναι στην επεξεργασία (αναβάθμιση, upgrading) των ορυκτών καυσίμων και στην παραγωγή αμμωνίας. Οι κυριότεροι καταναλωτές υδρογόνου είναι στις πετροχημικές μονάδες που περιλαμβάνουν διεργασίες όπως υδροαπαλκυλίωση, υδροαποθείωση και υδροπυρόλυση. Το υδρογόνο έχει και αρκετές άλλες χρήσεις. Το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως ένα μέσο υδρογόνωσης, ειδικότερα για την αύξηση του επιπέδου κορεσμού των ακόρεστων λιπών και ελαίων, παράγοντας προϊόντα τύπου μαργαρίνης. Επίσης το υδρογόνο εμπλέκεται στην παραγωγή της μεθανόλης και του υδροχλωρικού οξέος. Το υδρογόνο χρησιμοποιείται ακόμη ως ένα αναγωγικό μέσο για μεταλλιούχα ορυκτά.^[86]

Το υδρογόνο είναι πολύ διαλυτό σε πολλές σπάνιες γαίες και μεταβατικά μέταλλα^[87] και είναι διαλυτό σε νανοκρυσταλλικά και άμορφα μέταλλα.^[88] Η διαλυτότητα του υδρογόνου σε μέταλλα αυξάνεται από την επίδραση τοπικών διαστρεβλώσεων ή τοπικής παρουσίας «ακαθαρσιών»^[89] στο κρυσταλλικό πλέγμα^[90] Αυτές οι ιδιότητες μπορεί να είναι χρήσιμες όταν το υδρογόνο καθαρίζεται με διαβίβαση διαμέσου θερμών δίσκων από παλλάδιο, αλλά από την άλλη η υψηλή διαλυτότητα του υδρογόνου αποτελεί ένα μεταλλουργικό πρόβλημα, συμβάλλοντας στην ευθραυστότητα των πολλών μετάλλων,^[9] κάνοντας περισσότερο πολύπλοκο τον σχεδιασμό αγωγών και δεξαμενών αποθήκευσης^[9].

Εκτός από τις παραπάνω χρήσεις του υδρογόνου ως ένα αντιδραστήριο, το υδρογόνο έχει ευρύτατες εφαρμογές στη Φυσική και στη Μηχανική. Χρησιμοποιήθηκε ως ένα προστατευτικό αέριο στη συγκόλληση σε μεθόδους συγκόλλησης όπως η συγκόλληση με ατομικό υδρογόνο.^{[91][92]} Το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως ένας ψυκτικός στροφέας σε ηλεκτρογεννήτριες σε ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς, επειδή έχει την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα από όλα τα αέρια. Το υγρό υδρογόνο χρησιμοποιήθηκε στην κρυογενική έρευνα, που περιλαμβάνει τις μελέτες υπεραγωγιμότητας.^[93] Επειδή το υδρογόνο είναι ελαφρύτερο από τον αέρα, έχοντας λίγο περισσότερο από το 1/14 της πυκνότητάς του, χρησιμοποιήθηκε ευρύτατα ως ένα ανυψωτικό αέριο σε αερόστατα και αερόπλοια.^[94]

Σε πιο πρόσφατες εφαρμογές, το υδρογόνο χρησιμοποιήθηκε, καθαρό ή σε μείγμα με άζωτο (το μείγμα υδρογόνου - αζώτου αποκαλείται μερικές φορές ως «αέριο σχηματισμού», *forming gas*), ως ένας αέριος ιχνοθέτης για την ταχεία ανίχνευση διαρροής. Εφαρμογές του υδρογόνου μπορούν να βρεθούν στην αυτοκίνηση, σε χημικά προϊόντα, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε αεροδιαστημικές και τηλεπικοινωνιακές βιομηχανίες Block, Matthias (2004-09-03). "Hydrogen as Tracer Gas for Leak Detection". 16th WCNDT 2004. Montreal, Canada: Sensistor Technologies. Retrieved 2008-03-25.. Το υδρογόνο είναι εγκεκριμένο πρόσθετο τροφίμων (με τον κωδικό E949) που επιτρέπει τον έλεγχο διαρροής από πακεταρισμένα τρόφιμα, εκτός από άλλες αντιοξειδωτικές ιδιότητες.^[95]

Τα σπανιότερα ισότοπα του υδρογόνου έχουν τις δικές τους ειδικές εφαρμογές. Το δευτέριο χρησιμοποιείται ως ένας επιβραδυντής νετρονίων σε εφαρμογές πυρηνικής σχάσης.^[58] Το δευτέριο έχει ακόμη εφαρμογές στη χημεία και στη βιολογία για τη μελέτη των αντιδράσεων και ισοτοπικών φαινομένων.^[96] Το τρίτιο παράγεται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες και χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή βομβών υδρογόνου,^[97] ως ένας ραδιοϊσοτοπικός επισημαντής σε βιοεπιστήμες,^[50] και ως μια ραδιενεργή πηγή για φωτεινές μπογιές.^[98]

Η θερμοκρασία του τριπλού σημείου της ισορροπίας υδρογόνου ορίστηκε ως ένα πρότυπο σημείο στη θερμοκρασιακή κλίμακα ITS-90 και αντιστοιχεί σε 13,8033 K.^[99]

Το υδρογόνο ως ψυκτικό

Το υδρογόνο χρησιμοποιείται συχνά σε ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς ως ένα ψυκτικό σε γεννήτριες εξαιτίας ενός αριθμού ευνοϊκών ιδιοτήτων του που είναι άμεσο αποτέλεσμα των ελαφρών διατομικών μορίων του. Οι ευνοϊκές ιδιότητες του υδρογόνου που αξιοποιούνται σε αυτόν τον τομέα είναι η χαμηλή πυκνότητα, το χαμηλό ιξώδες, και η υψηλότερη σχετική θερμότητα και θερμοχωρητικότητα από όλα τα αέρια.

Το υδρογόνο ως φορέας ενέργειας

Το ίδιο το υδρογόνο δεν είναι ενεργειακή πηγή,^[100] εκτός από την υποθετική προοπτική της κατασκευής οικονομικά βιώσιμων μονάδων πυρηνικής σύντηξης που να χρησιμοποιούν δευτέριο ή τρίτιο, αλλά η απαιτούμενη τεχνολογία είναι προς το παρόν μακριά από την ανάπτυξη.^[101] Η ηλιακή ενέργεια προέρχεται από την πυρηνική σύντηξη υδρογόνου, αλλά αυτή η διεργασία είναι δύσκολο να επιτευχθεί ελεγχόμενη στη Γη.^[102] Προς το παρόν, το στοιχειακό υδρογόνο από ηλιακή, βιολογική ή ηλεκτρική πηγή απαιτεί περισσότερη ενέργεια από αυτή που εκλύει με την καύση του, οπότε κάτω από αυτές τις συνθήκες το υδρογόνο λειτουργεί ως ένας φορέας ενέργειας, δηλαδή σαν ένας συσσωρευτής. Το υδρογόνο μπορεί να ληφθεί από πηγές ορυκτών καυσίμων (όπως το φυσικό αέριο), αλλά αυτές οι πηγές είναι μη ανανεώσιμες.^[100]

Η ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου, τόσο του υγρού υδρογόνου όσο και του συμπιεσμένου υδρογόνου κάτω από κάθε παρακτική πίεση είναι σημαντικά μικρότερη από αυτήν των παραδοσιακών καυσίμων, παρόλο που η ενεργειακή πυκνότητά του ανά μονάδα βάρους είναι υψηλότερη.^[100] Σε κάθε περίπτωση, το στοιχειακό υδρογόνο έχει ευρύτατα συζητηθεί στον ενεργειακό τομέα, ως ένας πιθανός μελλοντικός φορέας ενέργειας σε κλίμακα παγκόσμιας οικονομίας.^[103] Για παράδειγμα, το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να παγιδευτεί, με δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα, και να επιδράσει σε νερό και να μετατραπεί σε συνθετικά ορυκτά καύσιμα.^[104] Το υδρογόνο που χρησιμοποιήθηκε για τη μεταφορά μπορεί να καεί σχετικά καθαρά, με κάποια έκλυση οξειδίων του αζώτου,^[105] αλλά χωρίς καθόλου ανθρακούχες εκπομπές.^[104] Ωστόσο, το κόστος εγκαταστάσεων που είναι σχετικά με μετάβαση σε μια πλήρη παγκόσμια οικονομία υδρογόνου μπορεί να είναι ουσιαστικής ανασταλτικής παράγοντας.^[106]

Το υδρογόνο και η βιομηχανία ημιαγωγών

Το υδρογόνο χρησιμοποιείται για να μετατρέπει σε κορεσμένους «σπασμένους» δεσμούς σε άμορφο πυρίτιο και σε άμορφο άνθρακα και αυτό βοηθά να σταθεροποιούνται οι ιδιότητες των υλικών.^[107] Επίσης, το υδρογόνο είναι ένας δυνάμει ηλεκτρονικός δότης για αρκετά οξυγονούχα υλικά, που περιλαμβάνουν το οξειδίο του ψευδαργύρου (ZnO),^{[108][109]} το διοξειδίο του κασσιτέρου (SnO₂), το οξειδίο του καδμίου (CdO), το οξειδίο του μαγνησίου (MgO),^[110] το διοξειδίο του ζirkονίου (ZrO₂), το διοξειδίο του αφνίου (HfO₂), το τριοξειδίο του λανθανίου (La₂O₃), το τριοξειδίο του υτρίου (Y₂O₃), το διοξειδίο του τιτανίου (TiO₂), το τιτανικό στρόντιο (SrTiO₃), το αργλικό λανθάνιο (LaAlO₃), το διοξειδίο του πυριτίου (SiO₂), το οξειδίο του αργιλίου (Al₂O₃), το πυριτικό ζirkόνιο (ZrSiO₄), το πυριτικό άφνιο (HfSiO₄) και το ζirkονικό στρόντιο (SrZrO₃).^[111]

Βιολογικές αντιδράσεις

Το υδρογόνο είναι ένα προϊόν από κάποιους τύπους αναερόβιου μεταβολισμού και παράγεται από αρκετούς μικροοργανισμούς, συνήθως μέσω αντιδράσεων που καταλύονται από ένζυμα που περιέχουν σίδηρο ή νικέλιο και ονομάζονται υδρογενάσες. Τέτοια ένζυμα καταλύουν την αναστρέψιμη οξειδοαναγωγική αντίδραση ανάμεσα στο μοριακό υδρογόνο και τα συστατικά του, δηλαδή δύο (2) πρωτόνια και δύο (2) ηλεκτρόνια. Η παραγωγή αέριου υδρογόνου συμβαίνει κατά τη μεταφορά σε νερό των αναγόμενων ισοδυνάμων που παράγονται κατά τη διάρκεια πυροσταφυλικής ζύμωσης.^[112]

Κατά τη διάσπαση του νερού, τα μόρια νερού αποσυνθέτονται στα συστατικά τους: δύο (2) πρωτόνια, δύο (2) ηλεκτρόνια και ένα άτομο οξυγόνου. Η διεργασία συμβαίνει κατά τη διάρκεια των «φωτεινών αντιδράσεων», σε όλους τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς. Κάποιοι τέτοιοι οργανισμοί, που περιλαμβάνουν το άλγος σχετικοσκληρή χλαμυδομονάδα (*Chlamydomonas reinhardtii*) και τα κυανοβακτήρια, έχουν αναπτύξει και ένα δεύτερο στάδιο «σκοτεινών αντιδράσεων» στις οποίες κάθε δύο (2) πρωτόνια και δύο (2) ηλεκτρόνια σχηματίζουν ένα μόριο αέριου στοιχειακού υδρογόνου, χρησιμοποιώντας για το σκοπό αυτό ειδικές υδρογενάσες στους χλωροπλάστες τους.^[113] Έχουν γίνει προσπάθειες να παραχθούν γενετικά κυανοβακτηριακές υδρογονάσες για να συνθέτουν αποτελεσματικά αέριο υδρογόνο ακόμη και παρουσία οξυγόνου.^[114] Ανάλογες προσπάθειες έχουν γίνει για χρήση γενετικά τροποποιημένων αλγών σε έναν βιοαντιδραστήρα.^[115]

Ασφάλεια και προφυλάξεις

Το υδρογόνο έχει έναν αριθμό από κινδύνους για την ανθρώπινη ασφάλεια, από εν δυνάμει εκτονώσεις του και πυρκαγιές όταν αναμειγνύεται με τον αέρα ως την πρόκληση ασφυξίας, αν έχει μεγάλη καθαρότητα ή και αν είναι σε μείγματα χωρίς οξυγόνο.^[116] Επιπλέον, το υγρό υδρογόνο είναι κρυογόνο και παρουσιάζει κινδύνους (όπως κρυοπαγήματα) που σχετίζονται με πολύ ψυχρά υγρά.^[117] Το υδρογόνο διαλύεται σε πολλά μέταλλα, και επιπρόσθετα στις τυχόν διαρροές του, ενδέχεται να έχει αρνητικές συνέπειες για αυτά, όπως ευθραυστότητα από υδρογόνο,^[118] οδηγώντας σε σπασίματα και εκρήξεις.^[119] Μια διαρροή αέριου υδρογόνου στον εξωτερικό αέρα μπορεί να αναφλεγεί αυθόρμητα. Επιπλέον, η φλόγα υδρογόνου, ενώ είναι εξαιρετικά θερμή, είναι σχεδόν αόρατη, και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ατυχήματα με εγκαύματα.^[120]

Ακόμη και η ερμηνεία των δεδομένων του υδρογόνου (που περιλαμβάνουν και τα δεδομένα ασφαλούς χρήσης του) διαταράσσεται από έναν αριθμό φαινομένων. Πολλές από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του υδρογόνου εξαρτώνται από την αναλογία παραϋδρογόνου/ορθοϋδρογόνου, που συχνά χρειάζεται μέρες ή και εβδομάδες σε μια δεδομένη θερμοκρασία για να φθάσει στη χαρακτηριστική για τη θερμοκρασία αναλογία ισορροπίας, που δίνεται από τα δεδομένα που δίνονται συνήθως για να το συνοδεύουν (για λόγους ασφαλείας). Οι παράμετροι εκτόνωσης του υδρογόνου, όπως κρίσιμη πίεση και κρίσιμη θερμοκρασία, εξαρτώνται πολύ από τη γεωμετρία των δοχείων που περιέχουν το υδρογόνο.^[116]

Αντιυδρογόνο

Το αντιυδρογόνο ($\bar{\text{H}}$) είναι το αντιυλικό ανάλογο του υδρογόνου. Το άτομο του αντιυδρογόνου αποτελείται από ένα αντιπρωτόνιο και ένα ποζιτρόνιο. Το αντιυδρογόνο είναι ο μοναδικός τύπος ατόμου αντιύλης που έχει παραχθεί, τουλάχιστον ως το 2015.^{[121][122]}

Δείτε επίσης

- | | | | |
|---|------------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| * | ■ <u>ΑΤΡάση υδρογόνου - καλίου</u> | ■ <u>Ακετογένεση</u> | ■ <u>Ανιόν υδριδίου</u> |
| | | ■ <u>Αναγωγικό αέριο</u> | ■ <u>Αντίδραση Μπος</u> |

- Αντίδραση Σαμπατίερ
- Αντιυδρογόνο
- Ασφάλεια υδρογόνου
- Άτομο υδρογόνου
- Αφυδρογόνωση
- Βακτήρια αναγωγής θείου
- Βακτήρια οξειδωσης υδρογόνου
- Βιοϋδρογόνο
- Βλάβη υδρογόνου
- Βόμβα υδρογόνου
- Γραμμή υδρογόνου
- Δεσμός υδρογόνου
- Δεϋδρατάση
- Δευτέριο
- Δευτεριούχο υδρογόνο
- Δοκιμή διαρροής υδρογόνου
- Ενζυμική παραγωγή υδρογόνου
- Ένωση εγκλεισμού υδρογόνου
- Ευθραστότητα από υδρογόνο
- Ημιστερεό υδρογόνο
- Ιόντα υδρογόνου
- Ισομερή περιστροφής του υδρογόνου
- Ισότοπα του υδρογόνου
- Καθαρότητα υδρογόνου
- Καονικό υδρογόνο
- Κατιόν διυδρογόνου
- Κατιόν τριυδρογόνου
- Κράμα Ντεβάρντα
- Κρυπτοφάνιο
- Κύκλος υδρογόνου
- Κυψέλη καυσίμου
- Μεθανογένεση
- Μεταλλικό υδρογόνο
- Μεταφορέας υδρογόνου
- Μικροβιακή κυψέλη καυσίμου
- Οικονομία υδρογόνου
- Οξυδρογόνο
- Οργανοτρόπος
- Παραγωγή υδρογόνου
- Παραγωγή υδρογόνου με ζύμωση
- Πλανήτης ηλίου
- Σκοτεινή ζύμωση
- Στερεό υδρογόνο
- Συμβούλιο υδρογόνου
- Συμπιεσμένο υδρογόνο
- Σύμπλεγμα ιόντων υδρογόνου
- Σύμπλοκο υδρογόνου
- Τεχνολογίες υδρογόνου
- Τρίτιο
- Τριυδρογόνο
- Υγρό υδρογόνο
- Υδρογόνο «εν τω γεννάσθαι»
- Υδρογονοειδές άτομο
- Υδρογονόλυση
- Υδρογονοειδές άτομο
- Υδρογονοπαραγωγικά άλγη
- Υδρογονουδρίτης
- Υδρογόνωση
- Υδροπυρόλυση
- Υδροξώνιο
- Υδρώνιο
- Υποδομή υδρογόνου
- Υπόθεση υδρογόνου
- Φάσμα υδρογόνου
- Φθορά από υδρογόνο
- Φωτοζύμωση
- Ψυχρή σύντηξη

Πηγές

- J.N. Murell, S.F.A. Kettle, J.N. Tedder: Ο Χημικός δεσμός, μια εισαγωγή στην Κβαντική Θεωρία, Μτφ Στ. Φαράντος, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 1992.
- The Orbitron. (<http://winter.group.shef.ac.uk/orbitron/AOs/6p/index.html>)

Παραπομπές και σημειώσεις

1. Palmer, D. (13 September 1997). "Hydrogen in the Universe". NASA. Retrieved 2008-02-05.
2. Ωστόσο, σημειώστε ότι η περισσότερη από τη μάζα του σύμπαντος δεν βρίσκεται με τη μορφή των χημικών στοιχείων. Δείτε τα άρθρα **σκοτεινή ύλη** και **σκοτεινή ενέργεια**
3. Εννοείται ότι επίσης ταυτοποιήθηκε, καταγράφηκε ότι παράχθηκε και ταυτοποιήθηκε, και διασώθηκε η καταγραφή, γιατί κατά λάθος ή χωρίς να ταυτοποιηθεί ή να καταγραφεί ποιος μπορεί να ξέρει αν είχε ξαναπαραχθεί και νωρίτερα ή αν καταστράφηκε κάποια τέτοια καταγραφή πριν γίνει δεκτή από την επιστημονική κοινότητα.
4. Σημειώστε ότι μόνο τα ηλεκτροθετικότερα από το υδρογόνο μέταλλα παράγουν υδρογόνο με την επίδραση οξέων σε αυτά. Για παράδειγμα ο **χαλκός** δεν παράγει.
5. Presenter: Professor Jim Al-Khalili (2010-01-21). "Discovering the Elements". Chemistry: A Volatile History. 25:40 minutes in. BBC. BBC Four.
6. "Hydrogen Basics — Production". Florida Solar Energy Center. 2007. Retrieved 2008-02-05.
7. Στην πραγματικότητα ηλεκτρολύεται αραιό υδατικό διάλυμα **υδροξειδίου του νατρίου**, το οποίο αρχικά δίνει μεταλλικό **νάτριο**, αλλά το τελευταίο αντιδρά με το νερό του περιβάλλοντός του και σχηματίζει υδρογόνο και νέο υδροξείδιο του νατρίου. Έτσι η συνολική στοιχειομετρική εξίσωση πράγματι αντιστοιχεί στην ηλεκτρόλυση του νερού.
8.]Τα μόριά του είναι συχνά μικρότερα από τα διάκενα μεταξύ των μεταλλικών ιόντων στα **μεταλλικά πλέγματα**
9. Christensen, C.H.; Nørskov, J.K.; Johannessen, T. (9 July 2005). "Making society independent of fossil fuels — Danish researchers reveal new technology". Technical University of Denmark. Retrieved 2008-03-28.
10. Και βέβαια αυξάνει το κόστος και το ρίσκο κινδύνου, αποθήκευσης, μεταφοράς και χρήσης του.
11. "Dihydrogen". O=Chem Directory. University of Southern Maine. Retrieved 2009-04-06.
12. Carcassi, M.N.; Fineschi, F. (2005). "Deflagrations of H₂–air and CH₄–air lean mixtures in a vented multi-compartment environment". Energy 30 (8): 1439–1451. doi:10.1016/j.energy.2004.02.012.
13. Patnaik, P (2007). A comprehensive guide to the hazardous properties of chemical substances. Wiley-Interscience. p. 402. ISBN 0-471-71458-5.
14. Hindenburg Hydrogen Fire, <http://spot.colorado.edu/~dziadeck/zf/LZ129fire.htm>, year 2005, accessdate: 2007-01-16
15. hydrogen flame visibility
16. Clayton, D.D. (2003). Handbook of Isotopes in the Cosmos: Hydrogen to Gallium. Cambridge University Press. ISBN 0-521-82381-1.



17. Millar, Tom (December 10, 2003). "Lecture 7, Emission Lines — Examples". PH-3009 (P507/P706/M324) Interstellar Physics. University of Manchester. Retrieved 2008-02-05.
18. Stern, David P. (2005-05-16). "The Atomic Nucleus and Bohr's Early Model of the Atom". NASA Goddard Space Flight Center (mirror). Retrieved 2007-12-20.
19. Stern, David P. (2005-02-13). "Wave Mechanics". NASA Goddard Space Flight Center. Retrieved 2008-04-16.
20. Staff (2003). "Hydrogen (H₂) Properties, Uses, Applications: Hydrogen Gas and Liquid Hydrogen". Universal Industrial Gases, Inc. Retrieved 2008-02-05.
21. Tikhonov, Vladimir I.; Volkov, Alexander A. (2002). "Separation of Water into Its Ortho and Para Isomers". *Science* 296 (5577): 2363. doi:10.1126/science.1069513. PMID 12089435.
22. Hritz, James (March 2006). "CH. 6 – Hydrogen" (PDF). NASA Glenn Research Center Glenn Safety Manual, Document GRC-MQSA.001. NASA. Retrieved 2008-02-05.
23. Shinitzky, Meir; Elitzur, Avshalom C. (2006). "Ortho-para spin isomers of the protons in the methylene group". *Chirality* 18 (9): 754–756. doi:10.1002/chir.20319. PMID 16856167.
24. Milenko, Yu. Ya.; Sibileva, R. M.; Strzhemechny, M. A (1997). "Natural ortho-para conversion rate in liquid and gaseous hydrogen". *Journal of Low Temperature Physics* 107 (1–2): 77–92. Bibcode:1997JLTP..107...77M. doi:10.1007/BF02396837.
25. Svadlenak, R. Eldo; Scott, Allen B (1957). "The Conversion of Ortho- to Parahydrogen on Iron Oxide-Zinc Oxide Catalysts". *Journal of the American Chemical Society* 79 (20): 5385–5388. doi:10.1021/ja01577a013.
26. Clark, Jim (2002). "The Acidity of the Hydrogen Halides". Chemguide. Retrieved 2008-03-09.
27. Kimball, John W. (2003-08-07). "Hydrogen". Kimball's Biology Pages. Retrieved 2008-03-04.
28. IUPAC Compendium of Chemical Terminology, Electronic version, Hydrogen Bond
29. Sandroock, Gary (2002-05-02). "Metal-Hydrogen Systems". Sandia National Laboratories. Retrieved 2008-03-23.
30. "Structure and Nomenclature of Hydrocarbons". Purdue University. Retrieved 2008-03-23.
31. "Organic Chemistry". Dictionary.com. Lexico Publishing Group. 2008. Retrieved 2008-03-23.
32. "Biochemistry". Dictionary.com. Lexico Publishing Group. 2008. Retrieved 2008-03-23.
33. Moers, Kurt (1920). "Investigations on the Salt Character of Lithium Hydride". *Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie* 113 (191): 179–228. doi:10.1002/zaac.19201130116.
34. Downs, Anthony J.; Pulham, Colin R. (1994). "The hydrides of aluminium, gallium, indium, and thallium: a re-evaluation". *Chemical Society Reviews* 23 (3): 175–184. doi:10.1039/CS9942300175.
35. Hibbs, David E.; Jones, Cameron; Smithies, Neil A. (1999). "A remarkably stable indium trihydride complex: synthesis and characterisation of [InH₃P(C₆H₁₁)₃]. *Chemical Communications* (2): 185–186. doi:10.1039/a809279f.
36. Miessler, Gary L.; Tarr, Donald A. (2003). *Inorganic Chemistry* (3rd ed.). Prentice Hall. ISBN 0-13-035471-6.
37. Okumura, Anthony M.; Yeh, L. I.; Myers, J. D.; Lee, Y. T (1990). "Infrared spectra of the solvated hydronium ion: vibrational predissociation spectroscopy of mass-selected H₃O⁺•(H₂O)_n•(H₂)_m". *Journal of Physical Chemistry* 94 (9): 3416–3427. doi:10.1021/j100372a014.
38. Perdoncin, Giulio; Scorrano, Gianfranco (1977). "Protonation Equilibria in Water at Several Temperatures of Alcohols, Ethers, Acetone, Dimethyl Sulfide, and Dimethyl Sulfoxide". *Journal of the American Chemical Society* 99 (21): 6983–6986. doi:10.1021/ja00463a035.
39. Carrington, Alan; R. McNab, Iain (1989). "The infrared predissociation spectrum of triatomic hydrogen cation (H₃⁺)". *Accounts of Chemical Research* 22 (6): 218–222. doi:10.1021/ar00162a004.
40. Gurov, Yu. B.; Aleshkin, D. V.; Behr, M. N.; Lapushkin, S. V.; Morokhov, P. V.; Pechkurov, V. A.; Poroshin, N. O.; Sandukovsky, V. G.; Tel'kushev, M. V.; Chernyshev, B. A.; Tschurenkova, T. D (2004). "Spectroscopy of superheavy hydrogen isotopes in stopped-pion absorption by nuclei". *Physics of Atomic Nuclei* 68 (3): 491–97. Bibcode:2005PAN....68..491G. doi:10.1134/1.1891200.
41. Korshennikov, A.; Nikolskii, E.; Kuzmin, E.; Ozawa, A.; Morimoto, K.; Tokanai, F.; Kanungo, R.; Tanihata, I. et al. (2003). "Experimental Evidence for the Existence of 7H and for a Specific Structure of 8He". *Physical Review Letters* 90 (8): 082501. Bibcode:2003PhRvL..90h2501K. doi:10.1103/PhysRevLett.90.082501.
42. Urey, Harold C.; Brickwedde, F. G.; Murphy, G. M. (1933). "Names for the Hydrogen Isotopes". *Science* 78 (2035): 602–603. Bibcode:1933Sci....78..602U. doi:10.1126/science.78.2035.602. PMID 17797765.
43. Oda, Y; Nakamura, H.; Yamazaki, T.; Nagayama, K.; Yoshida, M.; Kanaya, S.; Ikehara, M. (1992). "1H NMR studies of deuterated ribonuclease HI selectively labeled with protonated amino acids". *Journal of Biomolecular NMR* 2 (2): 137–47. doi:10.1007/BF01875525. PMID 1330130.
44. Broad, William J. (November 11, 1991). "Breakthrough in Nuclear Fusion Offers Hope for Power of Future". *The New York Times*. Retrieved 2008-02-12.
45. The Elements, Theodore Gray, Black Dog & Leventhal Publishers Inc., 2009
46. Staff (November 15, 2007). "Tritium". U.S. Environmental Protection Agency. Retrieved 2008-02-12.
47. Nave, C. R. (2006). "Deuterium-Tritium Fusion". HyperPhysics. Georgia State University. Retrieved 2008-03-08.

48. Kendall, Carol; Caldwell, Eric (1998). *Fundamentals of Isotope Geochemistry*. US Geological Survey. Retrieved 2008-03-08.
49. "The Tritium Laboratory". University of Miami. 2008. Retrieved 2008-03-08.
50. Holte, Aurali E.; Houck, Marilyn A.; Collie, Nathan L. (2004). "Potential Role of Parasitism in the Evolution of Mutualism in Astigmatid Mites". *Experimental and Applied Acarology* (Lubbock: Texas Tech University) 25 (2): 97–107. doi:10.1023/A:1010655610575.
51. van der Krogt, Peter (May 5, 2005). "Hydrogen". *Elementymology & Elements Multidict*. Retrieved 2010-12-20.
52. § IR-3.3.2, Provisional Recommendations, Nomenclature of Inorganic Chemistry, Chemical Nomenclature and Structure Representation Division, IUPAC. Accessed on line October 3, 2007.
53. Boyle, Robert "Tracts written by the Honourable Robert Boyle containing new experiments, touching the relation betwixt flame and air..." (London, England: 1672).
54. Winter, Mark (2007). "Hydrogen: historical information". WebElements Ltd. Retrieved 2008-02-05.
55. "Why did oxygen supplant phlogiston? Research programmes in the Chemical Revolution – Cambridge Books Online – Cambridge University Press". Retrieved 2011-10-22.
56. *Just the Facts—Inventions & Discoveries*, School Specialty Publishing, 2005.
57. "Hydrogen". *Van Nostrand's Encyclopedia of Chemistry*. Wylie-Interscience. 2005. pp. 797–799. ISBN 0-471-61525-0.
58. Emsley, John (2001). *Nature's Building Blocks*. Oxford: Oxford University Press. pp. 183–191. ISBN 0-19-850341-5.
59. Stwertka, Albert (1996). *A Guide to the Elements*. Oxford University Press. pp. 16–21. ISBN 0-19-508083-1.
60. A chronological history of electrical development from 600 B.C". *Archive.org*. Retrieved 2009-04-06.
61. "NTS-2 Nickel-Hydrogen Battery Performance 31". *Aiaa.org*. Retrieved 2009-04-06.
62. Jannette, A.G.; Hojnicky, J.S.; McKissock, D.B.; Fincannon, J.; Kerslake, T.W.; Rodriguez, C.D. (2004 (2002)). "Validation of international space station electrical performance model via on-orbit telemetry". *IECEC '02. 2002 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 2002. pp. 45–50. doi:10.1109/IECEC.2002.1391972. ISBN 0-7803-7296-4. Retrieved 2011-11-11.
63. Anderson, P.M.; Coyne, J.W. (2002). "A lightweight, high reliability, single battery power system for interplanetary spacecraft". *A lightweight high reliability single battery power system for interplanetary spacecraft 5*. pp. 5–2433. doi:10.1109/AERO.2002.1035418. ISBN 0-7803-7231-X.
64. "Mars Global Surveyor". *Astronautix.com*. Retrieved 2009-04-06.
65. Hubble servicing mission 4 essentials
66. Extending Hubble's mission life with new batteries
67. Crepeau, Bob (2006-01-01). "Niels Bohr: The Atomic Model". *Great Scientific Minds* (Great Neck Publishing). ISBN 1-4298-0723-7.
68. Berman, R.; Cooke, A. H.; Hill, R. W. (1956). "Cryogenics". *Annual Review of Physical Chemistry* 7: 1–20. Bibcode:1956ARPC....7....1B. doi:10.1146/annurev.pc.07.100156.000245.
69. Gagnon, Steve. "Hydrogen". *Jefferson Lab*. Retrieved 2008-02-05.
70. Haubold, Hans; Mathai, A. M. (November 15, 2007). "Solar Thermonuclear Energy Generation". *Columbia University*. Retrieved 2008-02-12.
71. Storrie-Lombardi, Lisa J.; Wolfe, Arthur M. (2000). "Surveys for $z > 3$ Damped Lyman-alpha Absorption Systems: the Evolution of Neutral Gas". *Astrophysical Journal* 543 (2): 552–576. arXiv:astro-ph/0006044. Bibcode:2000ApJ...543..552S. doi:10.1086/317138.
72. Dresselhaus, Mildred et al. (May 15, 2003). "Basic Research Needs for the Hydrogen Economy" (PDF). Argonne National Laboratory, U.S. Department of Energy, Office of Science Laboratory. Retrieved 2008-02-05.
73. Berger, Wolfgang H. (November 15, 2007). "The Future of Methane". *University of California, San Diego*. Retrieved 2008-02-12.
74. McCall Group, Oka Group (April 22, 2005). "H3+ Resource Center". *Universities of Illinois and Chicago*. Retrieved 2008-02-05.
75. Helm, H. et al.. "Coupling of Bound States to Continuum States in Neutral Triatomic Hydrogen". *Department of Molecular and Optical Physics, University of Freiburg, Germany*. Retrieved 2009-11-25.
76. Kruse, B.; Grinna, S.; Buch, C. (2002). "Hydrogen Status og Muligheter" (PDF). *Bellona*. Retrieved 2008-02-12.
77. Venere, Emil (May 15, 2007). "New process generates hydrogen from aluminum alloy to run engines, fuel cells". *Purdue University*. Retrieved 2008-02-05.
78. Oxtoby, D. W. (2002). *Principles of Modern Chemistry* (5th ed.). Thomson Brooks/Cole. ISBN 0-03-035373-4.
79. *Hydrogen Properties, Uses, Applications*. Universal Industrial Gases, Inc. 2007. Retrieved 2008-03-11.
80. Funderburg, Eddie (2008). "Why Are Nitrogen Prices So High?". *The Samuel Roberts Noble Foundation*. Retrieved 2008-03-11.
81. Lees, Andrew (2007). "Chemicals from salt". *BBC*. Archived from the original on October 26, 2007. Retrieved 2008-03-11.
82. "Development of solar-powered thermochemical production of hydrogen from water" (PDF).

83. Perret, Robert. "Development of Solar-Powered Thermochemical Production of Hydrogen from Water, DOE Hydrogen Program, 2007" (PDF). Retrieved 2008-05-17.
84. Δηλαδή χωρίς δυνατότητα επαφής με οξυγόνο.
85. Hirschler, M. M. (2000). *Electrical Insulating Materials: International Issues*. ASTM International. pp. 89–. **ISBN 978-0-8031-2613-8**. Retrieved 2012-07-13.
86. Chemistry Operations (2003-12-15). "Hydrogen". Los Alamos National Laboratory. Retrieved 2008-02-05.
87. Takeshita, T.; Wallace, W.E.; Craig, R.S. (1974). "Hydrogen solubility in 1:5 compounds between yttrium or thorium and nickel or cobalt". *Inorganic Chemistry* 13 (9): 2282–2283. doi:10.1021/ic50139a050.
88. Kirchheim, R.; Mutschele, T.; Kieninger, W.; Gleiter, H.; Birringer, R.; Koble, T (1988). "Hydrogen in amorphous and nanocrystalline metals". *Materials Science and Engineering* 99: 457–462. doi:10.1016/0025-5416(88)90377-1.
89. Παρουσία διαφόρων ουσιών.
90. Kirchheim, R. (1988). "Hydrogen solubility and diffusivity in defective and amorphous metals". *Progress in Materials Science* 32 (4): 262–325. doi:10.1016/0079-6425(88)90010-2.
91. Durgutlu, Ahmet (2003). "Experimental investigation of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas on TIG welding of austenitic stainless steel". *Materials & Design* 25 (1): 19–23. doi:10.1016/j.matdes.2003.07.004.
92. "Atomic Hydrogen Welding". *Specialty Welds*. 2007.
93. Hardy, Walter N. (2003). "From H₂ to cryogenic H masers to HiTc superconductors: An unlikely but rewarding path". *Physica C: Superconductivity*. 388–389: 1–6. Bibcode:2003PhyC..388....1H. doi:10.1016/S0921-4534(02)02591-1.
94. Barnes, Matthew (2004). "LZ-129, Hindenburg". *The Great Zeppelins*. Retrieved 2008-03-18.
95. "Report from the Commission on Dietary Food Additive Intake" (PDF). European Union. Retrieved 2008-02-05.
96. Reinsch, J; A Katz, J Wean, G Aprahamian, JT MacFarland (1980). "The deuterium isotope effect upon the reaction of fatty acyl-CoA dehydrogenase and butyryl-CoA". *J. Biol. Chem.* 255 (19): 9093–97. **PMID 7410413**.
97. Bergeron, Kenneth D. (2004). "The Death of no-dual-use". *Bulletin of the Atomic Scientists (Educational Foundation for Nuclear Science, Inc.)* 60 (1): 15. doi:10.2968/060001004.
98. Quigg, Catherine T. (March 1984). "Tritium Warning". *Bulletin of the Atomic Scientists* 40 (3): 56–57.
99. "International Temperature Scale of 1990" (PDF). *Procès-Verbaux du Comité International des Poids et Mesures*. 1989. pp. T23–T42. Retrieved 2008-03-25.
100. McCarthy, John (1995-12-31). "Hydrogen". Stanford University. Retrieved 2008-03-14.
101. "Nuclear Fusion Power". World Nuclear Association. May 2007. Retrieved 2008-03-16.
102. "Chapter 13: Nuclear Energy — Fission and Fusion". *Energy Story*. California Energy Commission. 2006. Retrieved 2008-03-14.
103. DOE Seeks Applicants for Solicitation on the Employment Effects of a Transition to a Hydrogen Economy". *Hydrogen Program (Press release)*. US Department of Energy. 2006-03-22. Retrieved 2008-03-16.
104. Carbon Capture Strategy Could Lead to Emission-Free Cars" (Press release). Georgia Tech. 2008-02-11. Retrieved 2008-03-16.
105. Heffel, James W. (2002). "NO_x emission and performance data for a hydrogen fueled internal combustion engine at 1500 rpm using exhaust gas recirculation". *International Journal of Hydrogen Energy* 28 (8): 901–908. doi:10.1016/S0360-3199(02)00157-X.
106. Romm, Joseph J. (2004). *The Hype About Hydrogen: Fact And Fiction In The Race To Save The Climate* (1st ed.). Island Press. **ISBN 1-55963-703-X**.
107. Le Comber, P. G.; Jones, D. I.; Spear, W. E. (1977). "Hall effect and impurity conduction in substitutionally doped amorphous silicon". *Philosophical Magazine* 35 (5): 1173–1187. Bibcode:1977PMag...35.1173C. doi:10.1080/14786437708232943.
108. Van de Walle, Chris G. (2000). "Hydrogen as a cause of doping in zinc oxide". *Physical Review Letters* 85 (5): 1012–1015. Bibcode:2000PhRvL..85.1012V. doi:10.1103/PhysRevLett.85.1012. **PMID 10991462**.
109. Janotti, Anderson; Van De Walle, CG (2007). "Hydrogen multicentre bonds". *Nature Materials* 6 (1): 44–47. Bibcode:2007NatMa...6...44J. doi:10.1038/nmat1795. **PMID 17143265**.
110. Kilic, Cetin; Zunger, Alex (2002). "n-type doping of oxides by hydrogen". *Applied Physics Letters* 81 (1): 73–75. Bibcode:2002ApPhL..81...73K. doi:10.1063/1.1482783.
111. Peacock, P. W.; Robertson, J. (2003). "Behavior of hydrogen in high dielectric constant oxide gate insulators". *Applied Physics Letters* 83 (10): 2025–2027. Bibcode:2003ApPhL..83.2025P. doi:10.1063/1.1609245.
112. Cammack, Richard; Robson, R. L. (2001). *Hydrogen as a Fuel: Learning from Nature*. Taylor & Francis Ltd. pp. 202–203. **ISBN 0-415-24242-8**.
113. Kruse, O.; Rupprecht, J.; Bader, K.-P.; Thomas-Hall, S.; Schenk, P. M.; Finazzi, G.; Hankamer, B (2005). "Improved photobiological H₂ production in engineered green algal cells". *The Journal of Biological Chemistry* 280 (40): 34170–7. doi:10.1074/jbc.M503840200. **PMID 16100118**.
114. Smith, H. O.; Xu, Q (2005). "IV.E.6 Hydrogen from Water in a Novel Recombinant Oxygen-Tolerant Cyanobacteria System" (PDF). FY2005 Progress Report. United States Department of Energy. Retrieved 2008-02-05.
115. Williams, Chris (2006-02-24). "Pond life: the future of energy". *Science (The Register)*. Retrieved 2008-03-24.

116. Brown, W. J. et al. (1997). "Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems" (PDF). NASA. Retrieved 2008-02-05.
117. "Liquid Hydrogen MSDS" (PDF). Praxair, Inc. September 2004. Retrieved 2008-04-16.
118. "'Bugs' and hydrogen embrittlement". *Science News* (Washington, D.C.) 128 (3): 41. 1985-07-20. doi:10.2307/3970088. JSTOR 3970088.
119. Hayes, B. "Union Oil Amine Absorber Tower". TWI. Retrieved 2010-01-29.
120. "Hydrogen Safety". Humboldt State University. Retrieved 2010-04-14.[dead link]
121. Charlton, Mike; Van Der Werf, Dirk Peter (1 March 2015). «Advances in antihydrogen physics». *Science Progress* **98** (1): 34–62. doi:10.3184/003685015X14234978376369 (https://dx.doi.org/10.3184%2F003685015X14234978376369). ISSN 0036-8504 (http://worldcat.org/issn/0036-8504).
122. Kellerbauer, Alban (29 January 2015). «Why Antimatter Matters». *European Review* **23** (01): 45–56. doi:10.1017/S1062798714000532 (https://dx.doi.org/10.1017%2FS1062798714000532).

Εξωτερικοί σύνδεσμοι

-  Πολυμέσα σχετικά με το θέμα Hydrogen στο Wikimedia Commons
 -  Λεξιλογικός ορισμός του υδρογόνο στο Βικιλεξικό
-

Ανακτήθηκε από "https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Υδρογόνο&oldid=10875165"