

Idrogeno

Lorenzo Giusti

Liceo Scientifico "Leonardo Da Vinci" classe IV B

Caratteristiche generali dell'elemento

L'idrogeno (dal greco ὕδωρ "hydor", *acqua*; la radice γεν/γον significa *generare*, quindi *generatore d'acqua*) è il primo elemento chimico della tavola periodica degli elementi, ha come simbolo H e come numero atomico 1.

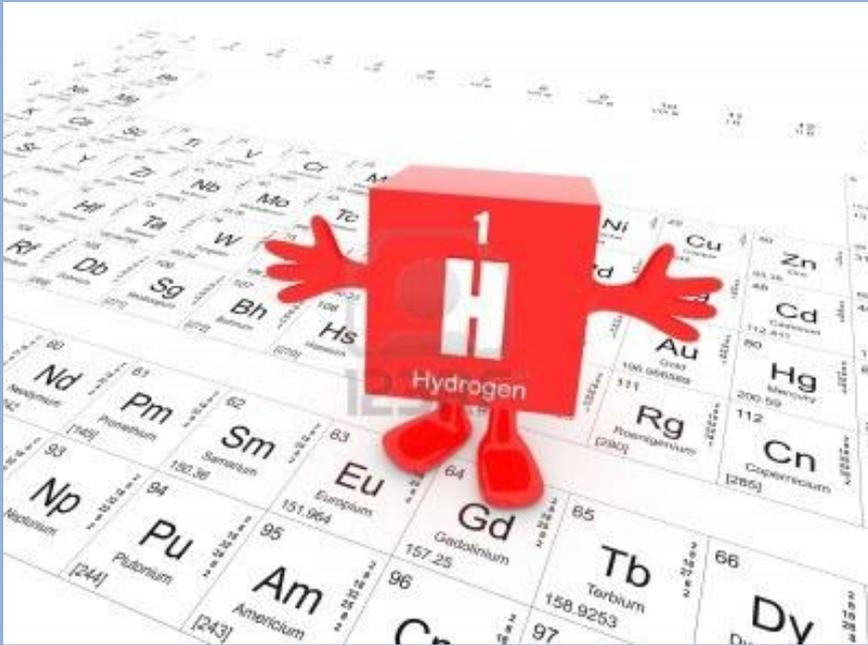
Allo stato elementare esiste sotto forma di molecola biatomica, H₂, che a pressione atmosferica e a temperatura ambiente (298 K) è un gas incolore, inodore, altamente infiammabile. L'idrogeno è l'elemento più leggero e più abbondante di tutto l'universo osservabile. È presente nell'acqua (11,19%) e in tutti i composti organici e organismi viventi. L'idrogeno forma composti con la maggior parte degli elementi, spesso anche per sintesi diretta. Le stelle sono principalmente composte di idrogeno nello stato di plasma di cui rappresenta il combustibile delle reazioni termonucleari, mentre sulla Terra è scarsamente presente allo stato libero e molecolare e deve quindi essere prodotto per i suoi vari usi. In particolare questo elemento è usato nella produzione di ammoniaca, nell'idrogenazione degli oli vegetali, in aeronautica (in passato nei dirigibili), come combustibile alternativo e, di recente, come riserva di energia nelle pile a combustibile. Inoltre è occluso in alcune rocce, come il granito.



Tavola Periodica degli Elementi

1	2											13	14	15	16	17	18
1	2											13	14	15	16	17	18
1	2											13	14	15	16	17	18
3	4											13	14	15	16	17	18
11	12											13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57 to 71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
87	88	89 to 103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106
107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124
125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142
143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160
161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178
179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196
197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214
215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232
233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250
251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268
269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286
287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304
305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322
323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340
341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358
359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376
377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394
395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412
413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430
431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448
449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466
467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484
485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502
503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520
521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538
539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556
557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574
575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592
593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610
611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628
629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646
647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664
665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682
683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700
701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718
719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736
737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754
755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772
773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790
791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808
809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826
827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844
845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862
863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880
881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898
899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916
917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934
935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952
953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970
971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988
989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006
1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024
1025	1026	1027	1028	1029	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040	1041	1042
1043	1044	1045	1046	1047	1048	1049	1050	1051	1052	1053	1054	1055	1056	1057	1058	1059	1060
1061	1062	1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069	1070	1071	1072	1073	1074	1075	1076	1077	1078
1079	1080	1081	1082	1083	1084	1085	1086	1087	1088	1089	1090	1091	1092	1093	1094	1095	1096
1097	1098	1099	1100	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109	1110	1111	1112	1113	1114
1115	1116	1117	1118	1119	1120	1121	1122	1123	1124	1125	1126	1127	1128	1129	1130	1131	1132
1133	1134	1135	1136	1137	1138	1139	1140	1141	1142	1143	1144	1145	1146	1147	1148	1149	1150
1151	1152	1153	1154	1155	1156	1157	1158	1159	1160	1161	1162	1163	1164	1165	1166	1167	1168
1169	1170	1171	1172	1173	1174	1175	1176	1177	1178	1179	1180	1181	1182	1183	1184	1185	1186
1187	1188	1189	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200	1201	1202	1203	1204
1205	1206	1207	1208	1209	1210	1211	1212	1213	1214	1215	1216	1217	1218	1219	1220	1221	1222
1223	1224	1225	1226	1227	1228	1229	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240
1241	1242	1243	1244	1245	1246	1247	1248	1249	1250	1251	1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258
1259	1260	1261	1262	1263	1264	1265	1266	1267	1268	1269	1270	1271	1272	1273	1274	1275	1276
1277	1278	1279	1280	1281	1282	1283	1284	1285	1286	1287	1288	1289	1290	1291	1292	1293	1294
1295	1296	1297	1298	1299	1300	1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307	1308	1309	1310	1311	1312
1313	1314	1315	1316	1317	1318	1319	1320	1321	1322	1323	1324	1325	1326	1327	1328	1329	1330
1331	1332	1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340	1341	1342	1343	1344	1345	1346	1347	1348
1349	1350	1351	1352	1353	1354	1355	1356	1357	1358	1359	1360	1361	1362	1363			

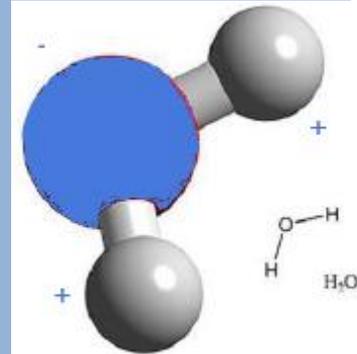
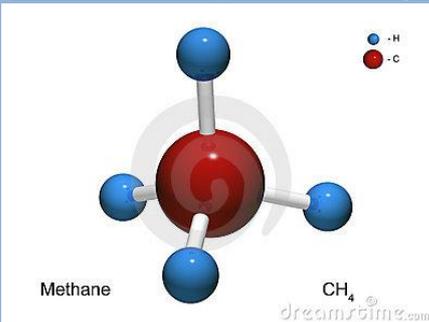
Percentuali in natura



L'idrogeno è l'elemento più abbondante dell'universo, forma fino al 75% della materia, in base alla massa, e più del 90%, in base al numero di atomi. Questo elemento si trova principalmente nelle stelle e nei giganti gassosi. Relativamente alla sua abbondanza generale, l'idrogeno è molto raro nell'atmosfera terrestre (1 ppm) e praticamente inesistente allo stato puro sulla superficie e nel sottosuolo terrestre. Giove e Saturno hanno circa l'80 % dell'idrogeno, il Sole il 90 %.

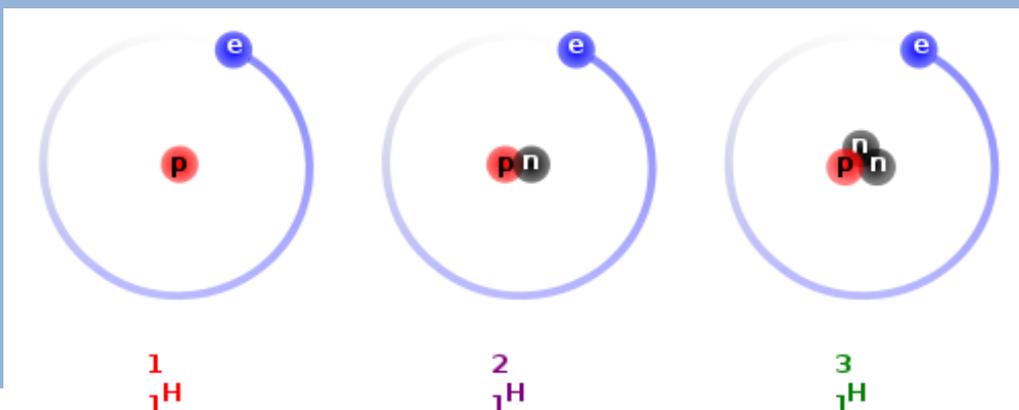
Sulla Terra invece solo l'1 % dei gas è idrogeno. La fonte più comune di questo elemento è

l'acqua, che è composta da due atomi di idrogeno e uno di ossigeno (H_2O). Altre fonti sono: la maggior parte della materia organica (che comprende tutte le forme di vita conosciute), i combustibili fossili e il gas naturale. Il metano (CH_4), che è un sottoprodotto della decomposizione organica, sta diventando una fonte di idrogeno sempre più importante



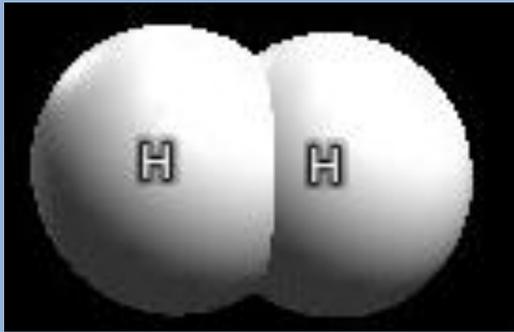
Isotopi

L'idrogeno elementare è un gas incolore e inodore a molecola biatomica (H_2), costituito da una miscela di tre isotopi: l'idrogeno o prozio ($1H$) (99,98% della miscela), il cui atomo è formato da un protone e da un elettrone, il deuterio $2H$ (indicato anche col simbolo D e detto idrogeno pesante) e il trizio $3H$, che hanno nel nucleo oltre al protone, rispettivamente uno e due neutroni. La quantità di deuterio è di 1:5900 rispetto all'idrogeno, mentre il trizio è presente solo in minime tracce.

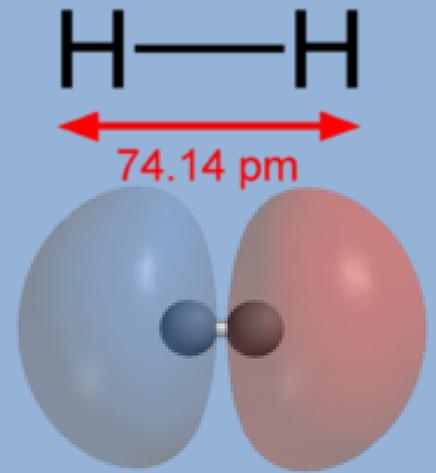


Molecola dell'idrogeno

Il diidrogeno ha formula H_2 . La sua molecola è quindi costituita da due atomi di idrogeno. In condizioni normali si presenta come un gas infiammabile, incolore ed inodore. Nell'uso comune viene chiamato anch'esso semplicemente idrogeno o idrogeno gassoso quando è necessario distinguerlo dall'elemento chimico omonimo.

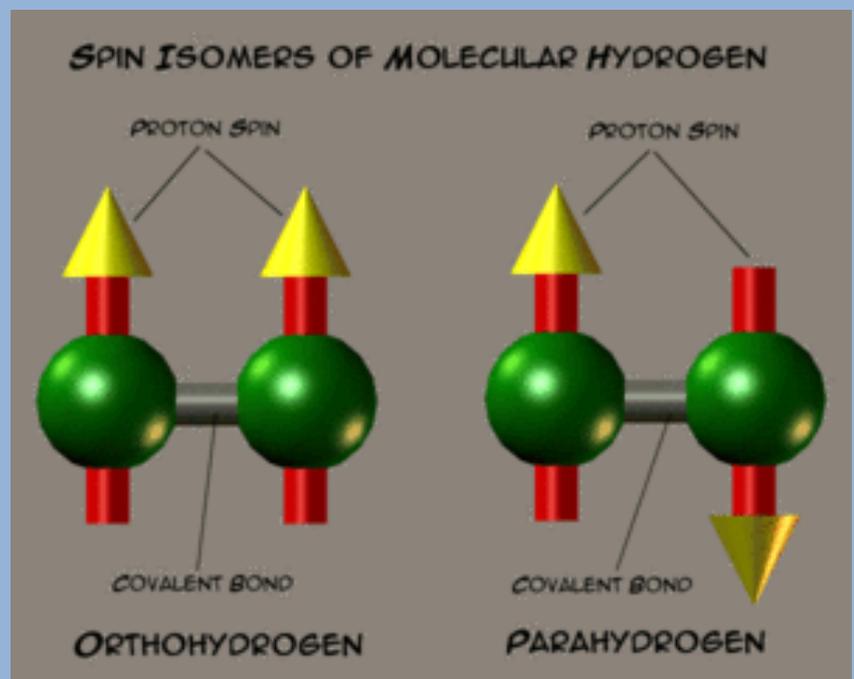


Si ottiene in laboratorio mediante reazione di acidi con metalli come lo zinco e, industrialmente, mediante l'elettrolisi dell'acqua, il reforming del gas naturale, la gassificazione di residui della raffinazione del petrolio. L'idrogeno è impiegato per la produzione dell'ammoniaca, per la desolforazione dei derivati del petrolio, come combustibile alternativo e, di recente, come fonte di energia per le pile a combustibile.



In condizioni normali il gas di idrogeno è una miscela di due diversi tipi di molecole, che differiscono a seconda che gli spin dei due nuclei atomici siano tra loro paralleli o antiparalleli. Queste due forme sono rispettivamente conosciute come orto-idrogeno e para-idrogeno. In condizioni standard, il rapporto tra orto e para è di circa 3 a 1 e la conversione di una forma nell'altra è talmente lenta da non avvenire in assenza di un catalizzatore. Le due forme differiscono a livello energetico, il che provoca piccole differenze nelle loro proprietà fisiche. Ad esempio, i punti di fusione ed ebollizione del paraidrogeno sono all'incirca 0,1 K più bassi dell'ortoidrogeno.

L'esistenza di queste due forme pone un inconveniente nella produzione industriale di idrogeno liquido: quando viene liquefatto, l'idrogeno è generalmente una miscela para:orto circa 25:75; lasciato a sé, nell'arco di un mese la miscela si arricchisce della forma para, che diventa il 90%; questa conversione libera calore che fa evaporare gran parte dell'idrogeno, che viene perso. Per ovviare a ciò, la liquefazione dell'idrogeno viene condotta in presenza di un catalizzatore a base di ossido di ferro; in questo modo l'idrogeno liquido ottenuto è composto per oltre il 99% dalla forma para.



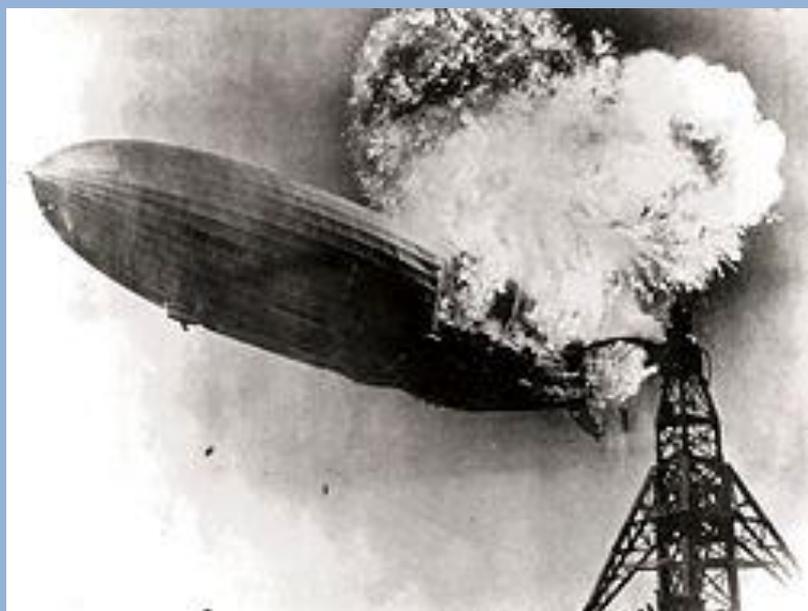
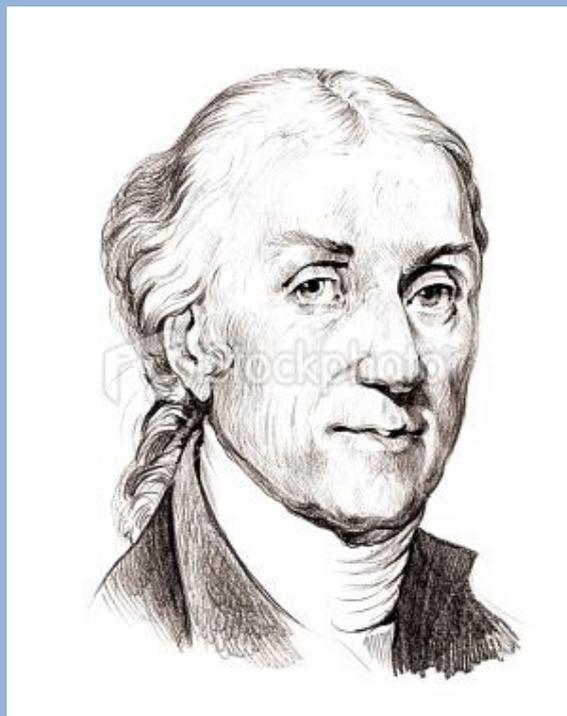
Note storiche

L'idrogeno biatomico gassoso (H_2) fu descritto formalmente per la prima volta da T. Von Hohenheim (conosciuto con il nome di Paracelso, 1493 - 1541), che lo ottenne artificialmente mescolando metalli con acidi forti. Paracelso non si rese conto che il gas infiammabile ottenuto in queste reazioni chimiche era un nuovo elemento chimico.

Nel 1671, Robert Boyle riscoprì e descrisse la reazione che avveniva quando si mescolavano limatura di ferro ed acidi diluiti, e che generava idrogeno gassoso.

Nel 1766, Henry Cavendish fu il primo a riconoscere l'idrogeno gassoso come una sostanza discreta, identificando il gas prodotto nella reazione metallo-acido come "aria infiammabile" e scoprendo che la combustione del gas generava acqua. Cavendish ebbe a che fare con l'idrogeno durante i suoi esperimenti con gli acidi ed il mercurio. Giunse erroneamente alla conclusione che l'idrogeno era un componente liberato dal mercurio e non dall'acido, ma fu capace di descrivere con precisione molte proprietà fondamentali dell'idrogeno. Tradizionalmente, si considera Cavendish come lo scopritore di questo elemento.

Nel 1783, Antoine Lavoisier assegnò all'elemento il nome di idrogeno (in francese Hydrogène, in greco ὕδωρ, ὑδάτος, "acqua" e γένος-ου, "generatore") quando provò (insieme a Laplace) la scoperta di Cavendish che la combustione del gas generava acqua.



Uno dei primi usi che si fece dell'idrogeno gassoso fu come gas di riempimento per aerostato e, successivamente, per altri tipi di aeronavi. La famosa tragedia del dirigibile Hindenburg si pensa non sia stata dovuta all'idrogeno con cui era stato riempito, infatti gli ingegneri avevano rivestito la struttura dell'aeronave in modo da non causare scintille, dato che si conosceva l'infiammabilità del gas. Quello fu un caso particolare di impiego, dato che non era disponibile l'elio gassoso, gas quasi altrettanto leggero, ma inerte. Al tempo l'idrogeno gassoso si otteneva per la reazione dell'acido solforico con il ferro metallico.

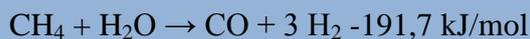
Produzione dell'idrogeno

Il fatto che l'idrogeno sia l'elemento più abbondante dell'universo potrebbe far pensare che sia estremamente facile produrlo, ad esempio estraendolo dall'acqua. Se questo è vero in linea teorica, nella pratica attualmente il modo più economico per produrre questo elemento consiste nell'utilizzo di petrolio o di altri combustibili fossili. Infatti, circa il 97% dell'idrogeno prodotto è ottenuto dai combustibili fossili, mentre soltanto un 3% si ottiene tramite l'elettrolisi dell'acqua. Questo processo, sfruttando combustibili fossili, porta all'emissione di elevate quantità di CO₂, le quali finiscono per aumentare il bilancio termico della terra e l'effetto serra.

Steamreforming

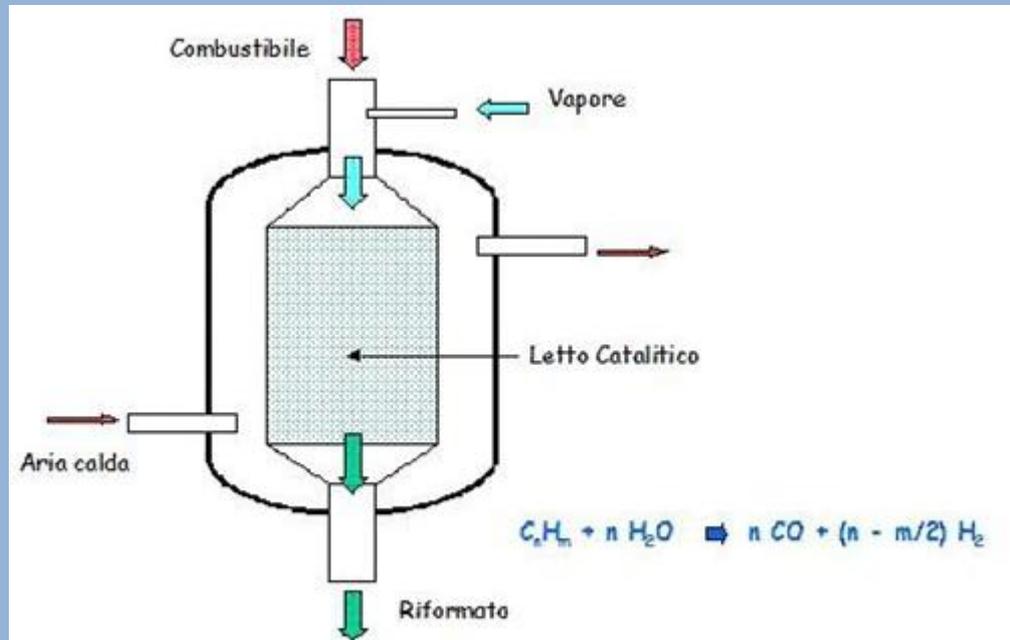
La produzione su vasta scala dell'idrogeno avviene solitamente mediante il processo di reforming del gas naturale (o "steamreforming")

Tale processo consiste nel far reagire metano (CH₄) e vapore acqueo (H₂O) ad una temperatura intorno a 700–1100 °C, per produrre syngas (una miscela costituita essenzialmente da monossido di carbonio e idrogeno), secondo la reazione:

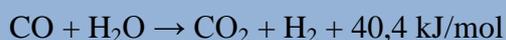


Il calore richiesto per attivare la reazione è generalmente fornito bruciando parte del metano.

La reazione è favorita a basse pressioni, tuttavia si fa avvenire a pressioni elevate (20 atm) visto che l'H₂ così ottenuto è il prodotto più commercializzabile. Il mix di prodotto è noto come gas di sintesi perché è spesso utilizzato direttamente per la produzione di metanolo ed altri composti correlati. A parte il metano, possono essere utilizzati altri idrocarburi per ottenere il Syngas con diverse proporzioni dei componenti prodotti.



Ulteriore idrogeno può essere recuperato dal monossido di carbonio (CO) attraverso la water gas shiftreaction, che si ottiene a circa 130 °C:



Essenzialmente, l'atomo di ossigeno (O) è strappato dall'acqua (vapore) per ossidare il carbonio (C), liberando l'idrogeno precedentemente legato a carbonio e ossigeno.

Elettrolisi

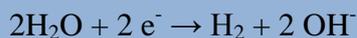
L'elettrolisi dell'acqua è un processo elettrolitico nel quale il passaggio di corrente elettrica causa la scomposizione dell'acqua in ossigeno ed idrogeno gassosi.

Dal punto di vista etimologico, il termine elettrolisi è composto dal prefisso elettro- (elettricità) e da lisi (separazione). L'etimologia del termine è connessa con il meccanismo del processo di elettrolisi dell'acqua, che consiste appunto nel "rompere" la molecola di acqua nei suoi elementi costituenti (idrogeno e ossigeno).

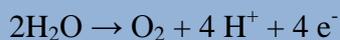
La cella elettrolitica è in genere composta da due elettrodi di un metallo inerte, (ad esempio platino) immersi in una soluzione elettrolitica e connessi ad una sorgente di corrente (ad esempio una batteria da 6 volt).

La corrente elettrica dissocia la molecola d'acqua negli ioni OH^- e H_3O^+ (e da una bassissima percentuale di protoni liberi H^+ , i quali tendono a reagire con le molecole di acqua per dare ioni H_3O^+).

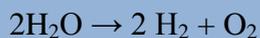
Al catodo gli ioni idrogeno (H_3O^+) acquistano elettroni in una reazione di riduzione che porta alla formazione di idrogeno gassoso:



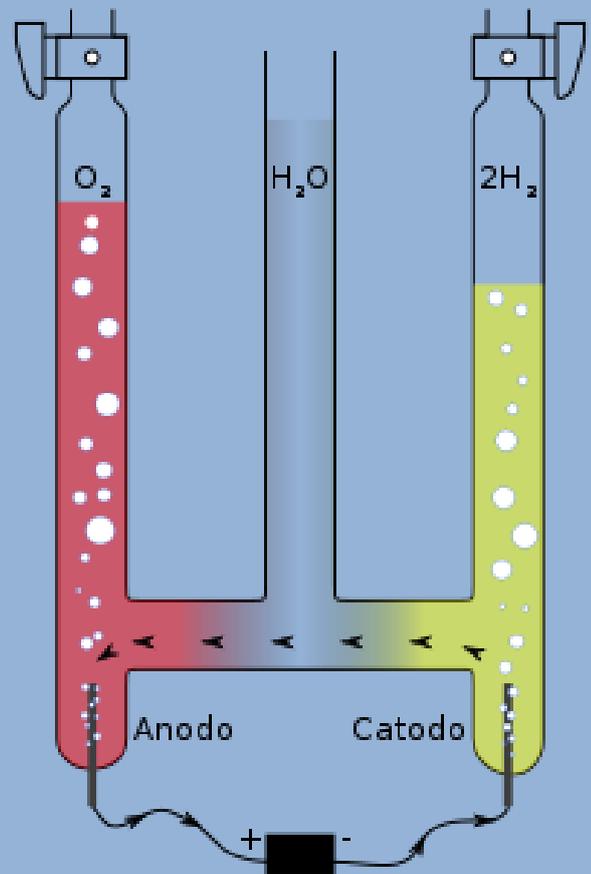
All'anodo, gli ioni idrossido (OH^-) subiscono ossidazione, cedendo elettroni:



Dalla somma delle due semireazioni precedenti si ottiene la seguente reazione completa:



Si formerà quindi un volume di idrogeno quasi doppio del volume di ossigeno (in quanto secondo la legge dei gas perfetti il numero di moli e il volume sono in proporzionalità diretta), quindi l'idrogeno avendo il doppio delle moli e il volume molare dell'idrogeno è di $11,42 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$, mentre per l'ossigeno è di $17,36 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$, quindi per l'idrogeno si ha quasi il doppio del volume dell'ossigeno.



Applicazioni dell'idrogeno

Combustibile

Stante l'attuale sviluppo tecnologico, l'idrogeno può essere effettivamente utilizzato a fini energetici come combustibile nei motori a combustione interna utilizzati su alcuni prototipi di auto. Il problema vero, sollevato da più parti, è però a monte: l'idrogeno atomico e molecolare è assai scarso in natura ovvero l'elemento in sé si trova combinato assieme ad altri elementi in vari composti sulla crosta terrestre; esso dunque non è una fonte primaria di energia come lo sono gas naturale, petrolio e carbone, in quanto deve essere prodotto artificialmente spendendo energia a partire da fonti

energetiche primarie. Esso sarebbe quindi impiegabile unicamente come vettore energetico cioè come mezzo per immagazzinare e trasportare l'energia disponibile ove occorra, mentre il ciclo di produzione/utilizzo sarebbe comunque inefficiente dal punto di vista termodinamico poiché la sua produzione richiederebbe in genere un'energia maggiore di quella che poi si renderebbe disponibile attraverso la sua 'combustione'. La molecola d'acqua è infatti più stabile e quindi meno energetica del diossigeno O_2 e del diidrogeno H_2 separati e segue la legge secondo la quale i processi "naturali" portano un sistema da un'energia più alta ad una più bassa tramite una trasformazione. Per



le leggi della termodinamica l'estrazione di idrogeno dall'acqua non può avvenire dunque come reazione inversa a costo zero, cioè senza spendere lavoro. Qualsiasi metodo di estrazione comporta quindi un costo che è pari all'energia liberata successivamente dalla combustione dell'idrogeno sotto forma di diidrogeno se a tal fine si utilizza l'esatto processo inverso, ed in realtà in tal caso anche maggiore perché non esiste alcuna macchina con rendimento pari al 100% durante il processo di estrazione. In altri termini la produzione di idrogeno sotto forma di diidrogeno attraverso il metodo più semplice, ovvero l'elettrolisi dell'acqua, e il successivo utilizzo dell'idrogeno sotto forma

di diidrogeno nella reazione inversa con O_2 nelle pile a combustibile non solo non porta ad alcun guadagno energetico, ma anzi, per quanto detto sopra, il guadagno netto energetico sarebbe negativo cioè ci sarebbe una perdita dovuta alle dissipazioni in calore. L'unico modo di usare in

maniera efficiente l'idrogeno come fonte di energia sarebbe ottenerlo come bioidrogeno a spese di alghe e batteri.

Attualmente il diidrogeno ottenuto da fonti solari, biologiche o elettriche ha un costo di produzione, in termini energetici, molto più elevato di quello della sua combustione per ottenere energia. H₂ può essere ottenuto con un guadagno netto di energia a partire da fonti fossili, come il metano (le reazioni di sintesi sono infatti diverse da quelle di combustione), però si tratta di fonti energetiche non rinnovabili cioè destinate comunque ad esaurirsi nel tempo ed in più con emissioni dirette di CO₂.

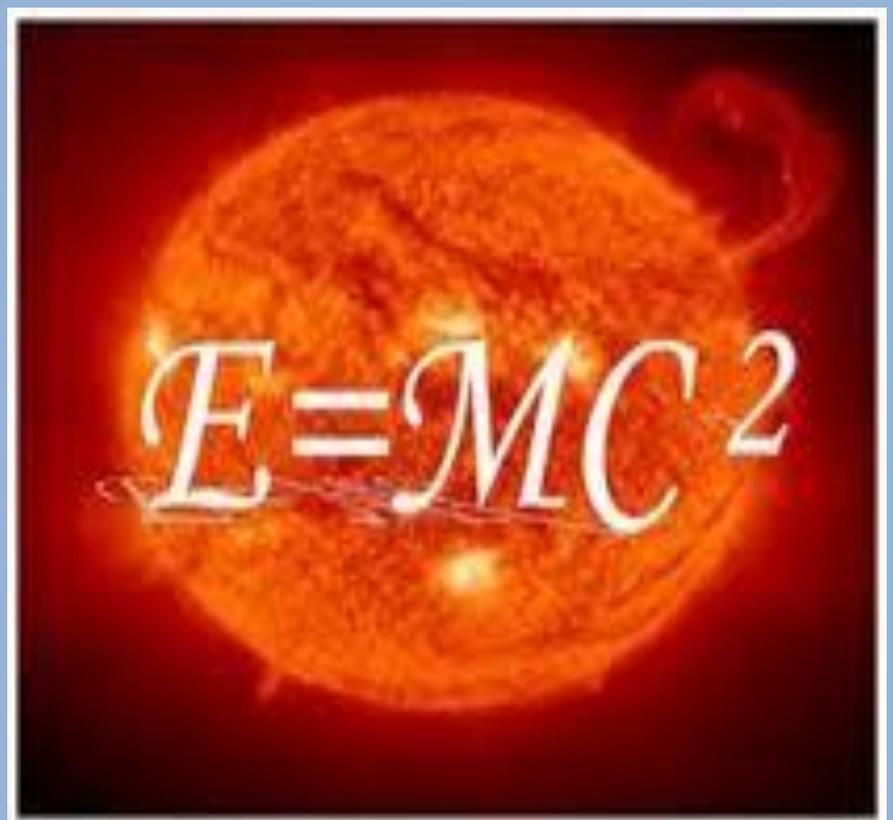
Un altro modo in cui l'idrogeno potrebbe venire utilizzato efficacemente come fonte di energia, a prescindere da qualunque processo di produzione, è quello della fusione nucleare ovvero in un impianto termonucleare con un ipotetico reattore nucleare a fusione alimentato da deuterio o trizio, una tecnologia che attualmente è ancora in via di sviluppo nel reattore sperimentale ITER e che potenzialmente potrebbe risolvere i problemi energetici mondiali poiché in tale reazione nucleare piccole quantità di idrogeno producono enormi quantità di energia: l'energia del Sole proviene infatti dalla fusione nucleare dell'idrogeno; si tratta tuttavia di un processo tecnologicamente complicato da gestire sulla Terra e tuttora oggetto di intensa ricerca.

Fusione nucleare

In fisica nucleare la fusione è il processo di reazione nucleare attraverso il quale i nuclei di due o più atomi vengono compressi tanto da far prevalere l'Interazione forte sulla repulsione elettromagnetica, unendosi tra loro ed andando così a generare un nucleo di massa maggiore dei nuclei reagenti nonché, talvolta, uno o più neutroni liberi; la fusione di elementi fino ai numeri atomici 26 e 28 (ferro e nichel) è esoenergetica, ossia emette più energia di quanta ne richieda il processo di compressione, oltre è endoenergetica, cioè assorbe energia (per la costituzione di nuclei atomici più pesanti).

Il processo di fusione è il meccanismo che alimenta il Sole e le altre stelle; all'interno di esse - tramite la nucleosintesi - si generano tutti gli elementi che costituiscono l'universo dall'elio fino all'uranio ed è stata riprodotta dall'uomo con la realizzazione della bomba H.

Nella fusione nucleare la massa e l'energia sono legate dalla teoria della relatività ristretta di Einstein secondo l'equazione: $E = mc^2$



In questo tipo di reazione il nuovo nucleo costituito ed il neutrone liberato hanno una massa totale minore della somma delle masse dei nuclei reagenti, con conseguente liberazione di un'elevata quantità di energia, principalmente energia cinetica dei prodotti della fusione.

Affinché avvenga una fusione, i nuclei devono essere sufficientemente vicini, in modo che la forza nucleare forte predomini sulla repulsione coulombiana (i due nuclei hanno carica elettrica positiva, si respingono): ciò avviene a distanze molto piccole, dell'ordine di qualche femtometro (10^{-15} metri). L'energia necessaria per superare la repulsione coulombiana può essere fornita ai nuclei portandoli ad altissima pressione (altissima temperatura, circa 10^7 kelvin, e/o altissima densità).

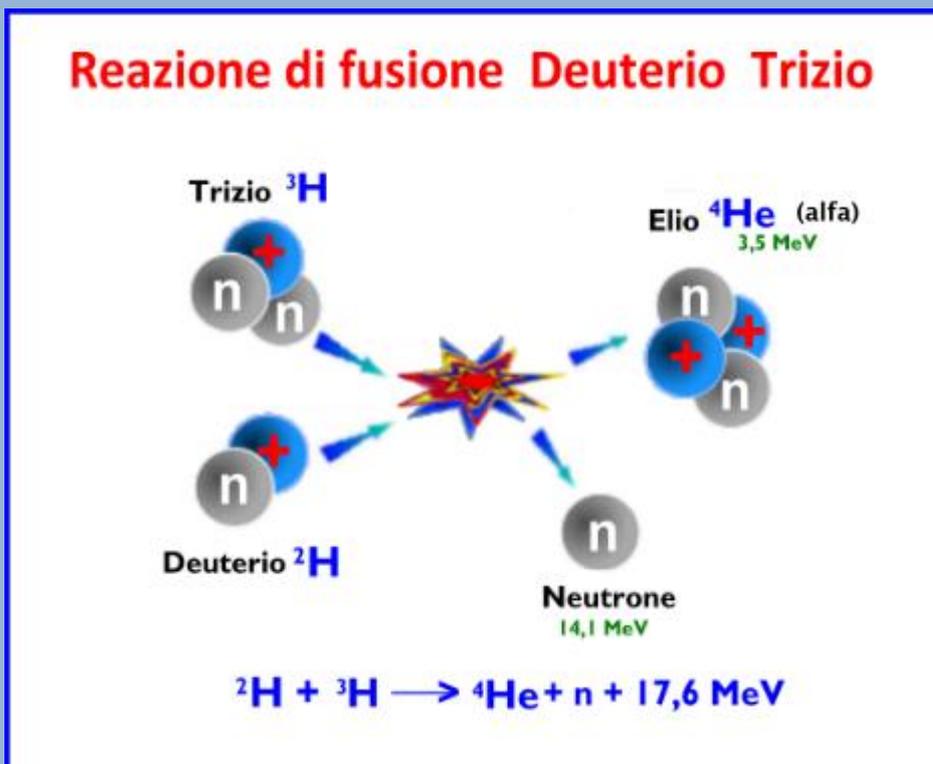
La fusione nucleare, nei processi terrestri, è usata in forma incontrollata per le bombe a idrogeno e in forma controllata nei reattori a fusione termonucleare, ancora in fase sperimentale.

Fusione tra deuterio e trizio

Per la realizzazione di reattori a fusione, il primo problema è di individuare reazioni aventi una bassa energia di soglia. Questo significa un criterio di Lawson inferiore e quindi un minore sforzo iniziale. Il secondo problema è rappresentato dalla produzione di neutroni, difficili da gestire e controllare. Le reazioni che non liberano neutroni, dette aneutroniche, sono di grande interesse, così come quelle che liberano neutroni a bassa energia.

La reazione che può avvenire nel sole con la soglia più bassa di energia è la fusione nucleare tra deuterio e trizio.

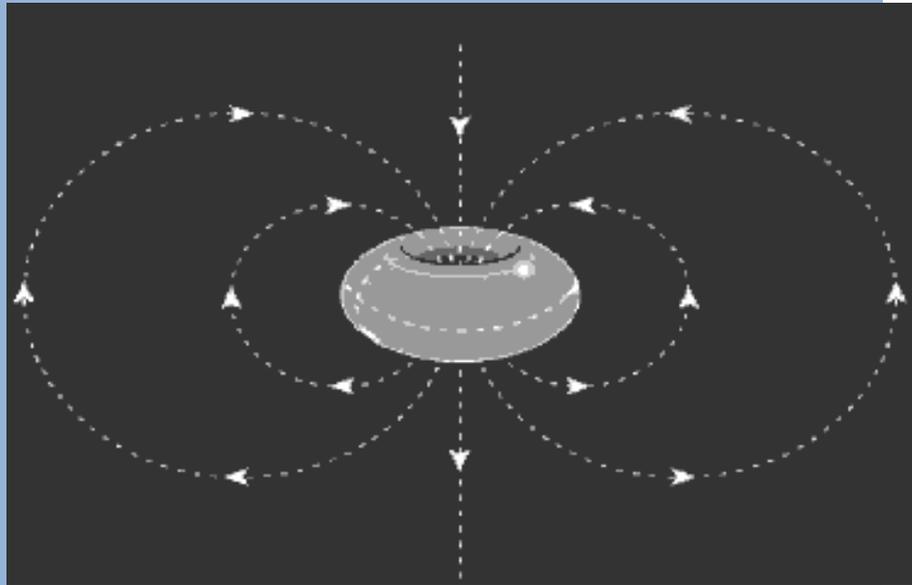
reazione D-T (la soglia più bassa, ~ 50 keV)



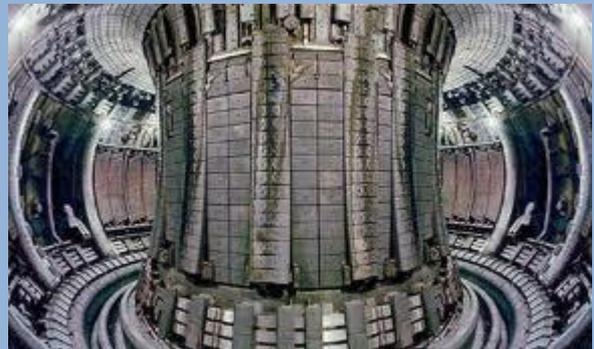
La reazione più probabile è quella che avviene tra un nucleo di deuterio e un nucleo di trizio, reazione in cui si genera un nucleo di elio (particella alfa) e un neutrone. In questa reazione la massa complessiva dei prodotti è inferiore a quella delle particelle interagenti e si verifica la liberazione di energia secondo il principio di equivalenza massa-energia. L'energia liberata si distribuisce tra la particella alfa e il neutrone in rapporto inverso alle rispettive masse.

Confinamento magnetico

Un tentativo per la realizzazione della fusione nucleare sulla terra è quella di confinare il plasma d'idrogeno con un campo magnetico. Un plasma è costituito da particelle cariche che possono quindi essere confinate da un appropriato campo magnetico. Sono noti molti modi di generare un campo magnetico in grado di isolare un plasma in fusione; tuttavia, in tutte queste configurazioni, le particelle cariche che compongono il plasma interagiscono inevitabilmente con il campo, influenzando l'efficienza del confinamento e riscaldando il sistema. Due sono le geometrie che si sono rivelate interessanti per confinare plasmi per fusione: lo specchio magnetico ed il *toro magnetico*. Lo specchio magnetico è una configurazione "aperta", cioè non è chiusa su se stessa, mentre il toro (una figura geometrica a forma di "ciambella") è una configurazione chiusa su se stessa intorno a un buco centrale. Varianti del toro sono le configurazioni *sferiche*, in cui il buco al centro del toro è di dimensioni molto ridotte.



Ognuno di questi sistemi di confinamento ha diverse realizzazioni, che differiscono tra loro nell'enfatizzare l'efficienza del confinamento o nel semplificare i requisiti tecnici necessari per la realizzazione del campo magnetico. La ricerca sugli specchi magnetici e su altre configurazioni aperte (bottiglie magnetiche, "pinch" lineari, cuspidi, ottupoli, ecc.) ha avuto un grande sviluppo negli anni 1960-1970, poi è stata abbandonata per le inevitabili perdite di particelle agli estremi della configurazione. Invece, una variante dei sistemi toroidali, il *tokamak* è risultato essere una soluzione inizialmente più semplice di altre per



un'implementazione da laboratorio. (Un tokamak è una macchina di forma toroidale che, attraverso il confinamento magnetico di isotopi di idrogeno allo stato di plasma, crea le condizioni affinché si verifichi, al suo interno, la fusione termonucleare allo scopo di estrarne l'energia prodotta.) Ciò l'ha reso il sistema su cui la ricerca scientifica in questo settore ha mosso i suoi passi più significativi. Attualmente il più promettente esperimento in questo campo è il progetto ITER.

