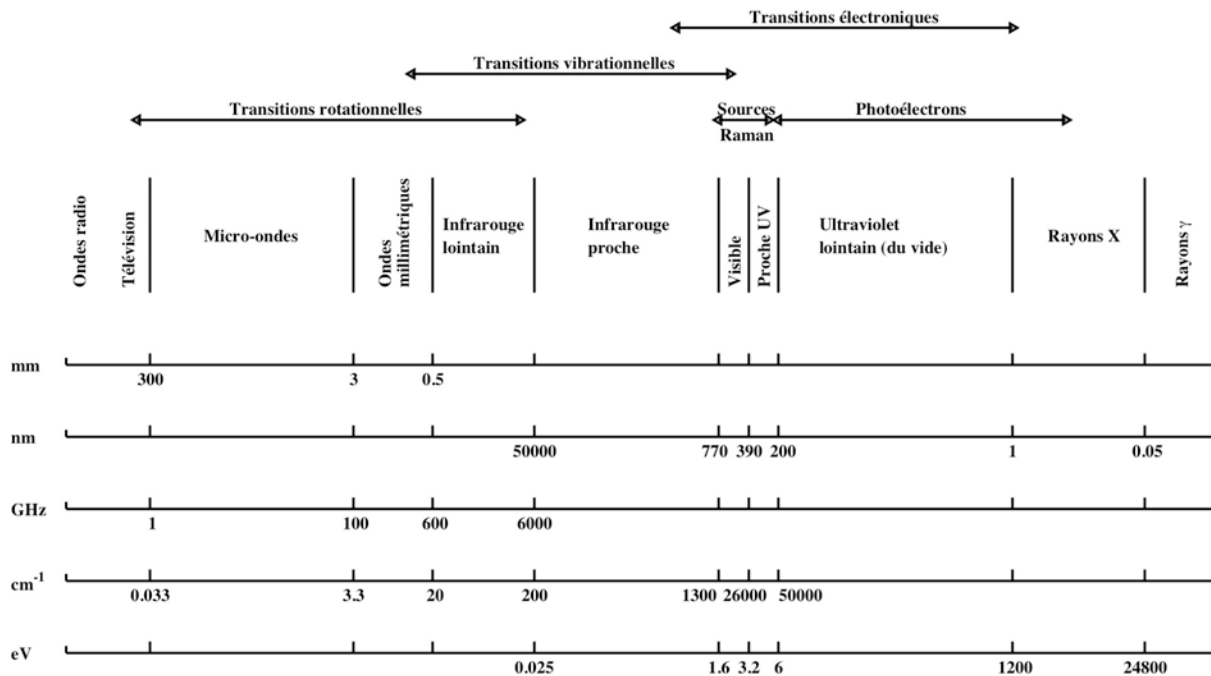


Notations des états et transitions spectroscopiques

Vincent BOUDON

I. Le spectre électromagnétique et les unités



Longueur d'onde : λ en km, m, mm, μm , nm, Å
 Fréquence : ν en Hz, MHz, GHz, THz
 Nombre d'onde : $\tilde{\nu}$ en cm⁻¹
 Energie : E en J, eV

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = hc\tilde{\nu} \quad E(\text{eV}) = \frac{E(\text{J})}{e}$$

Constante de Planck : $h = 6,626\,068\,96(33) \times 10^{-34}$ J.s

Vitesse de la lumière : $c = 299\,792\,458$ m.s⁻¹ (exact)

Charge de l'électron : $e = 1,602\,176\,487 \times 10^{-19}$ C (Coulomb)

Constantes fondamentales : voir <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/>

Tableau page suivante : les préfixes d'unités.

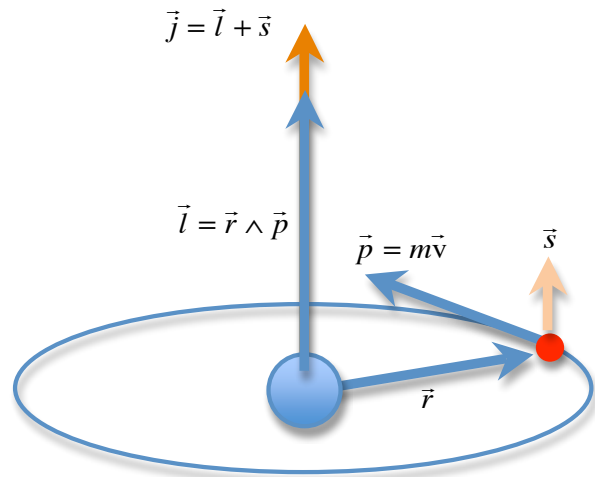
10^N	Préfixe	Symbole	Multiplicateur
10^{24}	yotta	Y	Quadrillion
10^{21}	zetta	Z	Trilliard
10^{18}	exa	E	Trillion
10^{15}	péta	P	Billiard
10^{12}	téra	T	Billion
10^9	giga	G	Milliard
10^6	méga	M	Million
10^3	kilo	k	Mille
10^2	hecto	h	Cent
10^1	déca	da	Dix
10^0	unité	–	Un, une
10^{-1}	déci	d	Dixième
10^{-2}	centi	c	Centième
10^{-3}	milli	m	Millième
10^{-6}	micro	μ	Millionième
10^{-9}	nano	n	Milliardième
10^{-12}	pico	p	Billionième
10^{-15}	femto	f	Billiardième
10^{-18}	atto	a	Trillionième
10^{-21}	zepto	z	Trilliardième
10^{-24}	yocto	y	Quatrillionième

(Source : Wikipedia)

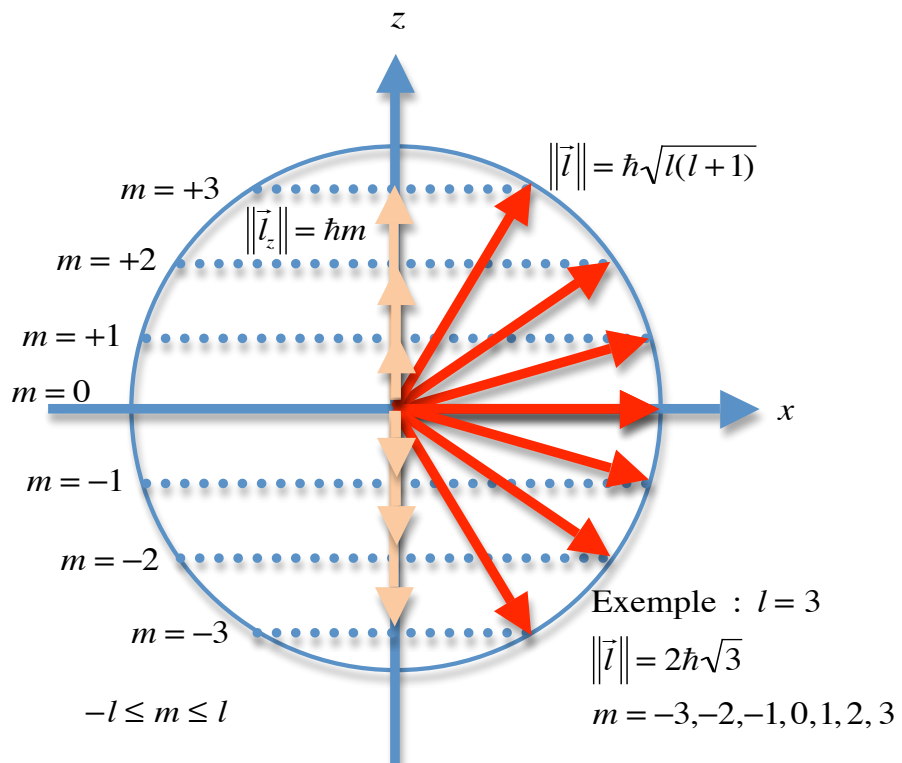
II. Le moment angulaire en mécanique quantique

II.1 Définition

Le *moment angulaire* est, en mécanique, une quantité essentielle pour l'étude des objets en rotation. La figure ci-contre définit le *moment angulaire orbital* \vec{l} d'un objet en orbite autour d'un autre (par exemple un satellite autour d'une planète) comme le produit vectoriel du vecteur position \vec{r} par la quantité de mouvement $\vec{p} = m\vec{v}$ où m est la masse du satellite et \vec{v} sa vitesse.



En mécanique quantique, le moment angulaire (par exemple celui d'un électron tournant autour d'un proton dans un atome d'hydrogène) est *quantifié*. Sa norme (longueur du vecteur) et sa composante selon l'axe z du référentiel lié au laboratoire ne peuvent prendre que certaines valeurs, comme illustré sur le schéma ci-dessous. l et m sont les *nombre quantiques* associés au moment angulaire orbital. l ne peut prendre que des valeurs entières et positives : 0, 1, 2, ... m prend les valeurs entières positives ou négatives comprises entre $-l$ et $+l$.



II.2 Le spin

La prise en compte de la *relativité restreinte* dans l'équation fondamentale de la mécanique quantique (*équation de Schrödinger*, du nom du physicien autrichien Erwin Schrödinger, 1887–1961) mène à l'écriture d'une nouvelle équation (*équation de Dirac*, du nom du physicien britannique Paul Dirac, 1902–1984) qui fait apparaître le moment angulaire intrinsèque de l'électron, le *spin* (correspondant en quelque sorte à une rotation de l'électron sur lui-même, même si cette image n'est pas exacte).

Ce spin \vec{s} est associé aux nombres quantiques s et m_s analogues à l et m ci-dessus, sauf qu'ils prennent des valeurs demi-entières : $s = \frac{1}{2}$ et $m_s = -\frac{1}{2}$ ou $+\frac{1}{2}$.

II.3 Fermions et bosons

Les particules constituant la matière (électrons, protons, neutrons, ...) possèdent toutes un spin demi-entier et sont appelées *fermions* (du nom du physicien italien Enrico Fermi, 1901–1954). Une de leurs caractéristiques essentielles est qu'il est interdit, à l'intérieur d'un système quantique donné, à deux fermions d'être exactement dans le même état quantique. C'est le *principe d'exclusion de Pauli* (du nom du physicien autrichien Wolfgang Pauli, 1900–1958) que nous retrouverons plus loin, lors de l'étude des atomes à plusieurs électrons.

Les particules vecteurs des forces fondamentales ont quant à elles un spin entier et sont appelées *bosons* (du nom du physicien indien Satyendranath Bose, 1894–1974). Par exemple, le *photon* (force électromagnétique) a un spin 0. Le *graviton* (hypothétique vecteur de la force gravitationnelle) aurait un spin 2.

Un ensemble de particules (par exemple atome) peut avoir un moment angulaire total (voir plus loin) entier ou demi entier et donc être soit un boson, soit un fermion.

Les bosons d'un système quantique, contrairement aux fermions, peuvent se retrouver tous dans le même état quantique. C'est la *condensation de Bose-Einstein* qui est un sujet de recherche très important actuellement (applications à la métrologie, aux horloges atomiques, etc).

II.4 Somme de moments angulaires

Les différents moments angulaires d'un système quantique s'additionnent. Par exemple, le moment angulaire orbital et le spin d'un électron s'additionnent pour donner le *moment angulaire électronique total* \vec{j} (voir première figure de la page précédente). Le nombre quantique j associé ne peut prendre que certaines valeurs,

$$|l - s| \leq j \leq l + s.$$

Dans le cas de l'électron, l étant entier et s demi-entier, j est demi-entier.

Pour un atome à plusieurs électrons (voir plus loin), on peut définir le *moment angulaire orbital électronique total*,

$$\vec{S} = \sum_i \vec{s}_i$$

le *spin électronique total*,

$$\vec{L} = \sum_i \vec{l}_i$$

et le *moment angulaire électronique total*, $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$.

De plus, si on tient compte du *spin du noyau*, \vec{I} , on a le *moment angulaire total*, $\vec{F} = \vec{J} + \vec{I}$.

Dans les molécules, la situation se complique encore, avec la présence de moments angulaires de rotation et de vibration.

III. L'atome d'hydrogène.

L'atome d'hydrogène (un électron et un noyau constitué d'un proton), de deutérium, de tritium, ou encore les ions hydrogénoïdes (He^+ , Li^{2+} , ...) sont les plus simples des systèmes quantiques. Ce sont les seuls qui peuvent se résoudre analytiquement (tout comme pour le problème à deux corps en mécanique classique).

III.1 Couches électroniques

En première approximation (si on ne tient compte que de l'attraction coulombienne entre le noyau et l'électron), les états électroniques de l'atome d'hydrogène ont pour énergie :

$$E_n = \frac{E_H}{n^2}, \quad n = 1, 2, \dots, \infty, \quad E_H = -13,6 \text{ eV}.$$

Le *nombre quantique principal*, n , définit la *couche électronique*. Les valeurs 1, 2, 3, ... sont souvent notées K, L, M, ...

Une *transition d'émission* entre un état n_1 et un état $n_2 < n_1$ a pour énergie

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_{n_1} - E_{n_2} \\ &= E_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right). \end{aligned}$$

III.2 Sous-couches électroniques

Un second nombre quantique, l , lié au moment angulaire orbital de l'électron prend les valeurs 0, 1, 2, 3, ..., $n-1$, généralement notées s, p, d, f, ... Il définit la *sous-couche*.

III.3 Orbitales électroniques

Le nombre quantique magnétique m est quant à lui lié à la projection du moment angulaire sur l'axe des z et prend les valeurs $-l, -l+1, \dots, l-1, l$.

Une fonction d'onde $\psi_{n,l,m}$ est appelée une *orbitale* que l'on note souvent par le couple nl . On parlera ainsi d'orbitales 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d, etc.

III.4 Spin et structure fine

L'électron possède un moment angulaire intrinsèque, appelé *spin*. Le nombre quantique associé, s , vaut $\frac{1}{2}$. Le nombre quantique de projection sur l'axe des z , m_s , vaut $\pm\frac{1}{2}$.

Le nombre quantique associé au moment angulaire électronique total (orbital + spin) est noté j et prend les valeurs demi-entières telles que :

$$|l - s| \leq l \leq l + s.$$

Une théorie plus complète de l'atome d'hydrogène, incluant la relativité restreinte et donc utilisant l'équation de Dirac (voir plus haut), montre que l'énergie des états électroniques dépend en réalité de n et de j , c'est la *structure fine* :

$$E_{n,j} = \frac{E_H}{n^2} \left(1 + \frac{\alpha^2}{n^2} \left(\frac{n}{j+1/2} - \frac{3}{4} \right) \right),$$

$$\alpha = 7,297\,352\,570(5) \times 10^{-3} \text{ (constante de structure fine)}$$

III.5 Etats électroniques

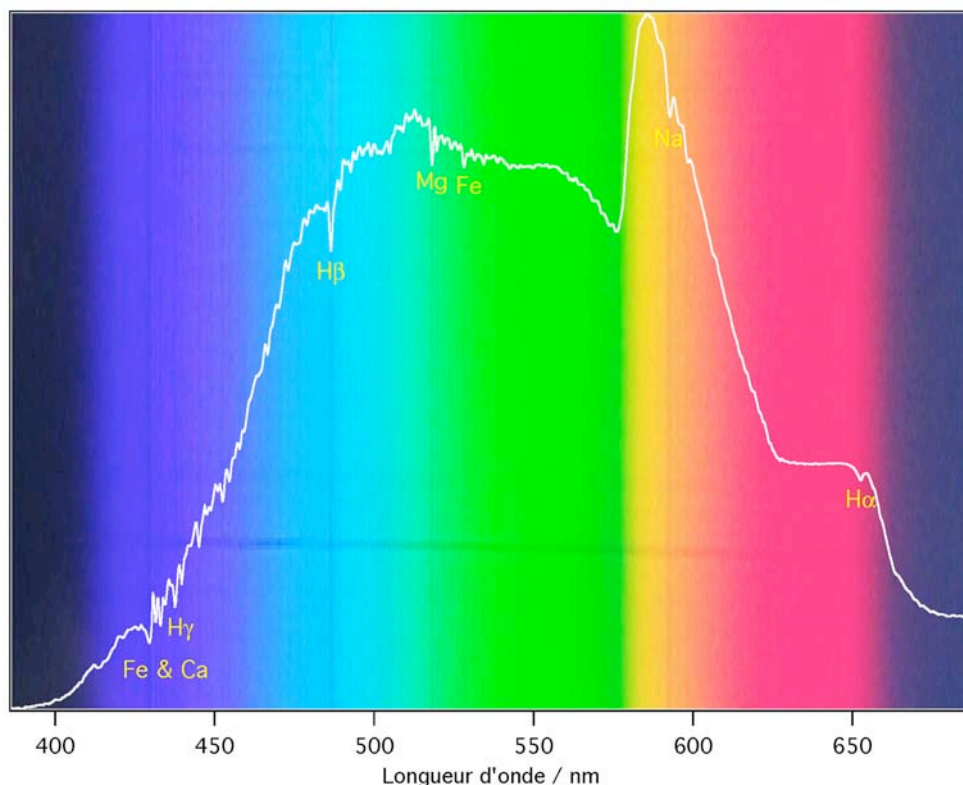
Un état électronique de l'hydrogène est noté $^{2s+1}l_j$, où $l = 0, 1, 2, 3, \dots$ est noté S, P, D, F, ... (on utilise les majuscules pour les *états* et les minuscules pour les *orbitales*; la distinction entre les deux notions n'étant effective que pour les atomes à plusieurs électrons, voir plus loin).

III.6 Structure hyperfine

Le noyau (ici un proton) lui-même possède un spin, associé au nombre quantique $I=1/2$. On peut donc définir un *moment angulaire total* de l'atome, dont le nombre quantique associé est noté F . Une théorie complète de l'atome d'hydrogène montre que les énergies des états électroniques dépendent aussi de F . C'est la *structure hyperfine*. Elle est en particulier à l'origine de la célèbre raie de l'hydrogène à $\lambda = 21 \text{ cm}$.

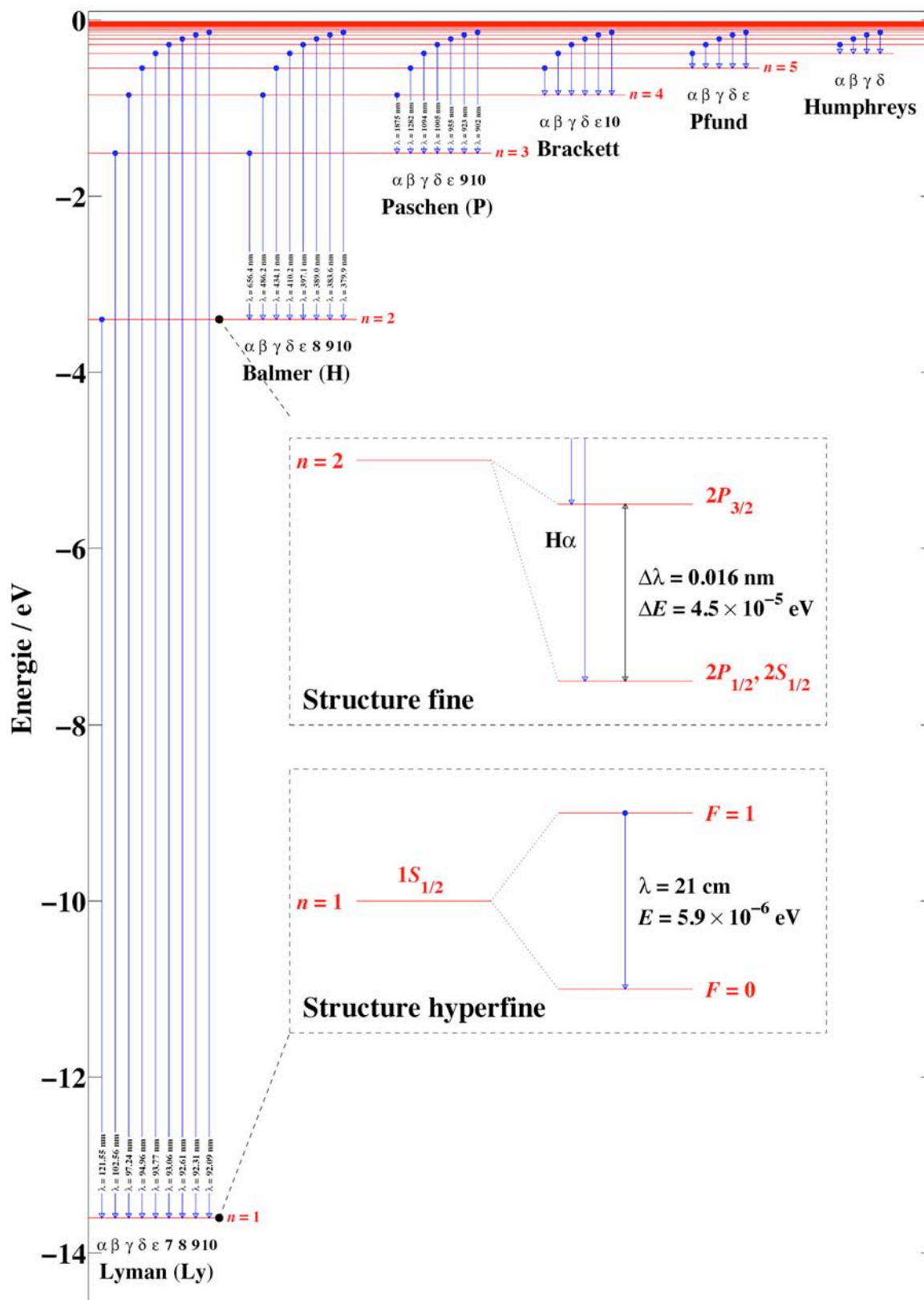
III.7 Illustrations

Le spectre ci-dessous montre 3 raies de la série de Balmer ($H\alpha$, $H\beta$ et $H\gamma$) dans le spectre visible du Soleil (spectre V. Boudon/SAB). D'autres raies atomiques sont aussi visibles.



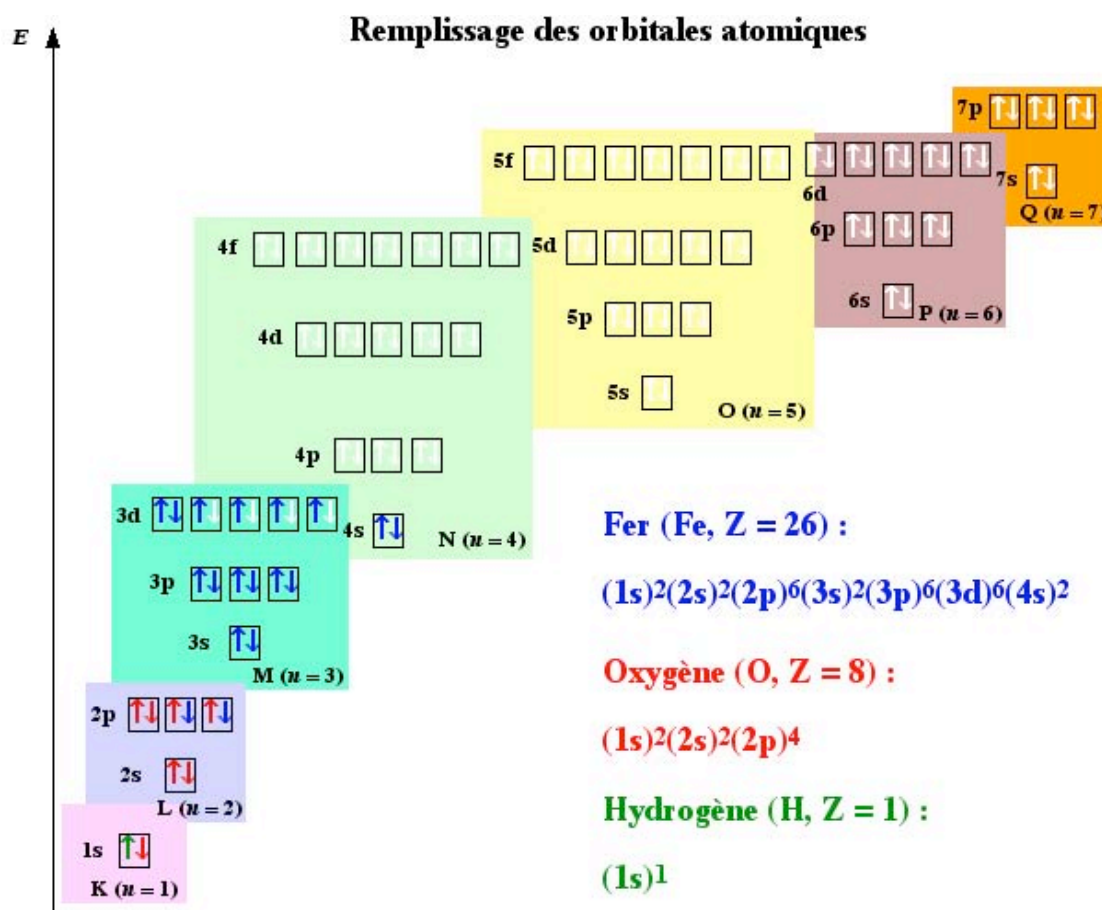
Le schéma page suivante résume les différents états électroniques et le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène.

Le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène



IV. Les atomes à plusieurs électrons

Le cas des atomes à Z électrons (Z étant le *numéro atomique* égal au nombre de protons et d'électrons) est beaucoup plus complexe et il n'existe pas de solution analytique. Les *orbitales* de l'hydrogène, c'est-à-dire les fonctions d'onde à un électron, servent de base au calcul et permettent de décrire la *configuration électronique*. Les orbitales sont remplies en respectant le *principe d'exclusion de Pauli* qui dit que deux électrons (qui sont des fermions, voir plus haut) ne peuvent jamais occuper le même état (*i.e.* ne peuvent pas avoir tous leurs nombres quantiques égaux).



La sous-couche 4s étant d'énergie plus basse que la 3d, elle est remplie en premier. Les éléments $Z = 21$ à 30, correspondant au remplissage de la sous-couche 3d, la sous-couche 4s étant pleine, sont appelés *éléments de la première série de transition*.

Dans la *classification périodique des éléments* (page suivante), les lignes correspondent aux *couches* (K, L, M, ...) et les colonnes aux *sous-couches* (s, p, d, f, ...).

Chaque *état électronique* est caractérisé par son *moment angulaire orbital total* (nombre quantique L), son *spin total* (nombre quantique S) et son *moment angulaire électronique total* (nombre quantique J) et est noté (notation la plus courante) :

$$^{2S+1}L_J,$$

$L = 0, 1, 2, 3, \dots$ étant noté par une lettre S, P, D, F, ... Exemples : $^1S_{1/2}$, $^3D_{5/2}$, ...

Un site à explorer absolument : <http://www.webelements.com>.

Periodic Table for the *Table of Isotopes** (2001)

Periodic Table for the Table of Contents

18 (VIII)

1 (IA)

Hydrogen	Helium	Neon	Fluorine	Oxygen	Nitrogen	Carbon	Boron	Lithium	Beryllium	Sodium	Magnesium	Aluminum	Silicon	Phosphorus	Sulfur	Chlorine	Argon	Potassium	Calcium	Scandium	Titanium	Vanadium	Chromium	Manganese	Iron	Cobalt	Nickel	Copper	Zinc	Gallium	Germanium	Arsenic	Selenium	Bromine	Krypton	Xenon	Radium	Actinium	Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium	Lanthanum	Cerium	Praseodymium	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Hoium	Erbium	Ytterbium	Lutetium	Scandium	Titanium	Vanadium	Chromium	Manganese	Iron	Cobalt	Nickel	Copper	Zinc	Gallium	Germanium	Arsenic	Selenium	Bromine	Krypton	Xenon	Radium	Actinium	Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium	Lanthanum	Cerium	Praseodymium	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Hoium	Erbium	Ytterbium	Lutetium																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
1	2	10	9	8	7	6	5	4	3	19	18	17	16	15	14	13	12	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	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

† Lanthanides

‡ Actinides

V. Les ions

Les atomes peuvent être ionisés, par exemple par le rayonnement UV issu des étoiles. C'est particulièrement vrai dans le milieu interstellaire. Un atome ionisé a perdu un ou plusieurs électrons et est donc chargé positivement. Exemple : O^{2+} est un atome d'oxygène deux fois ionisé. La configuration électronique des ions atomiques se détermine comme pour les atomes (voir ci-dessus).

VI. Intensités et règles de sélection

L'intensité d'une transition entre un état initial ψ_i et un état final ψ_f est proportionnelle au carré l'intégrale

$$\left| \int \psi_i \mu \psi_f d\tau \right|^2$$

où μ est le *moment dipolaire électrique* (on parle de *transition dipolaire électrique* ; il existe aussi des *transitions dipolaires magnétiques* et des *transitions quadrupolaires*, etc, d'intensité beaucoup plus faible).

Les transitions ne sont pas possibles entre tous les états, l'intégrale ci-dessus étant nulle dans certains cas. Les règles donnant les conditions de non-nullité de cette intégrale sont appelées *règles de sélection*.

Exemple : pour l'atome d'hydrogène, les transitions électroniques doivent satisfaire :

$$\Delta n \text{ quelconque, } \Delta l = \pm 1, \Delta j = 0, \pm 1$$

Pour un atome à plusieurs électrons, les nombres quantiques des états $^{2S+1}L_J$ sont en général approximatifs (les fonctions d'onde correspondantes sont en général une superposition d'orbitales hydrogénoïdes avec des nombres quantiques différents). Il est donc possible que les règles de sélections soient violées, donnant lieu à des *raies interdites* (voir ci-dessous).

VII. Notation des raies atomiques

En astronomie, il est courant de désigner par le chiffre romain I les raies spectrales des atomes neutres, et par II, III, IV, ..., celles des atomes une, deux, trois, ..., fois ionisés.

Exemples : OI, NII, OIII, ArIV, MgII, FeVIII, ...

Les *raies interdites*, c'est-à-dire les raies ne respectant pas les *règles de sélection* (qui ne sont qu'une approximation) et qui ont une intensité très faible, sont notées par des crochets.

Les *raies interdites* ne respectant pas la règle $\Delta S = 0$ sont notées par un crochet à droite, par exemple : CIII].

Les autres *raies interdites* sont notées par deux crochets, par exemple : [CIII].

Tout ceci ne sert qu'à désigner l'élément responsable de la transition. Pour spécifier celle-ci complètement, il faut utiliser une notation détaillée, comme par exemple

$$^2D_{5/2} \rightarrow ^2P_{3/2}.$$

VIII. Les molécules

Le cas de molécules est très complexe, car celles-ci possèdent des états :

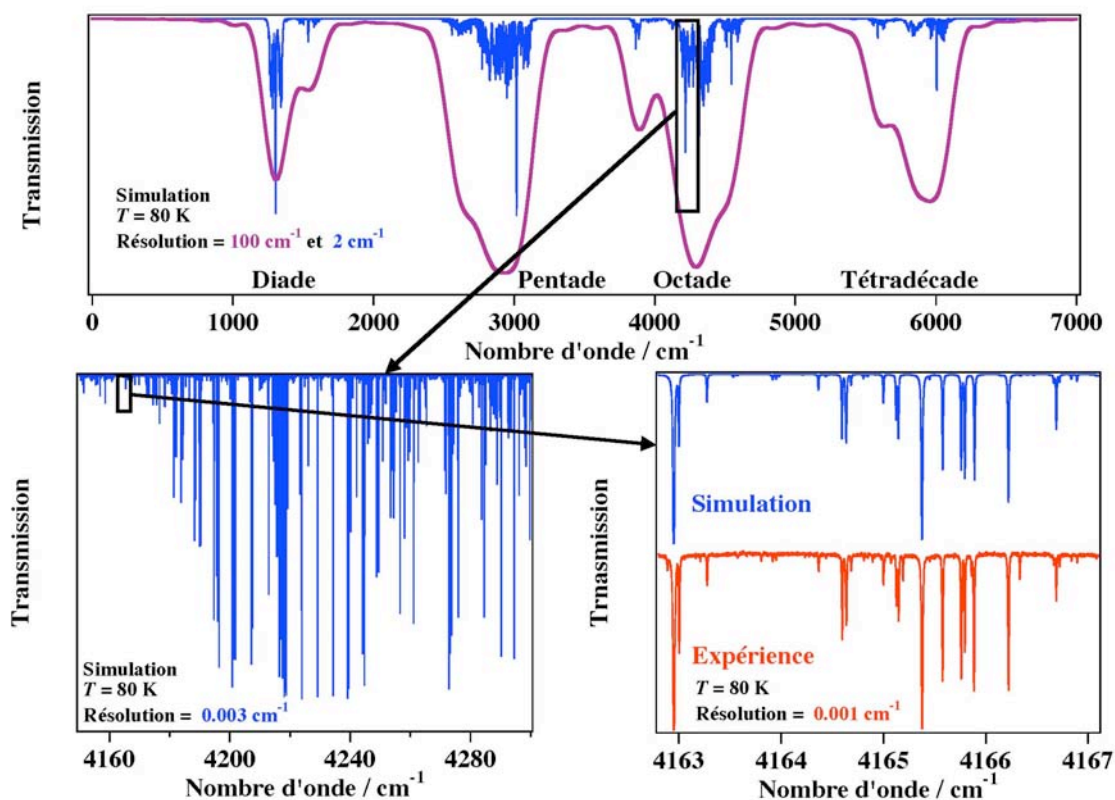
- électroniques (transitions généralement dans l'UV),
- de vibration (mouvement des noyaux, transitions dans l'infrarouge),
- de rotation (transition micro-ondes).

Chaque transition électronique a sa structure vibrationnelle, qui a elle-même sa structure rotationnelle, qui a elle-même une structure fine (effet de la symétrie moléculaire) et sa structure hyperfine (due aux spins nucléaires).

On observe surtout des spectres *d'absorption dipolaire* (quelquefois d'émission) dans les domaines radio et micro-ondes (rotation) et infrarouge (rotation-vibration), voire ultraviolet (transitions électroniques des ions et radicaux moléculaires).

Les différents mouvements moléculaires sont décrits par des *nombres quantiques* qui obéissent à des *règles de sélection*.

La figure ci-dessous illustre la complexité du spectre du méthane.



(Figure extraite de V. Boudon et al., uB Sciences n°3, mai 2008.)

IX. Profils spectraux

Une raie spectrale n'est pas infiniment fine. Elle est *élargie* par différents phénomènes.

IX.1 La largeur naturelle

Toute raie a naturellement une certaine largeur, due à la *relation d'incertitude d'Eisenberg* (du nom du physicien allemand Werner Heisenberg, 1091–1976),

$$\Delta E \cdot \Delta \tau \geq \frac{\hbar}{2},$$

où $\Delta \tau$ est la *durée de vie* de l'état quantique atteint par la transition, forcément finie, ce qui implique une largeur en énergie (et donc en nombre d'onde, en longueur d'onde, etc) ΔE non-nulle. Cependant, dans beaucoup de cas, cette largeur reste très faible devant les autres causes d'élargissement. L'élargissement naturel donne à la raie un forme *gaussienne* (du nom du mathématicien allemand Carl Friedrich Gauss, 1777–1855).

IX.2 La largeur Doppler

La température d'un gaz à l'équilibre thermodynamique est lié à la distribution des vitesses des molécules qui le composent. Cette distribution statistique est de forme gaussienne. La vitesse des molécules déplaçant des raies par *effet Doppler* (du nom du physicien autrichien Christian Doppler, 1803–1853), la résultante est un profil de raie de forme gaussienne (une somme de raies de chaque molécule du gaz, avec une distribution gaussienne autour de la position de la raie non déplacée, correspondant à la vitesse moyenne nulle),

$$I(\nu) = \frac{2I_0}{\Delta \nu} \sqrt{\frac{\ln(2)}{\pi}} e^{-4 \ln(2) \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right)^2}$$

où I_0 est l'intensité de la raie, ν_0 est la fréquence de la transition et

$$\Delta \nu = \nu_0 \sqrt{\frac{2kT}{mc^2}},$$

avec T la température du gaz, m la masse de la molécule, $k \approx 1,3806 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ la constante de Boltzmann (du nom du physicien autrichien Ludwig Boltzmann, 1844–1906) et c la vitesse de la lumière.

IX.3 L'élargissement collisionnel

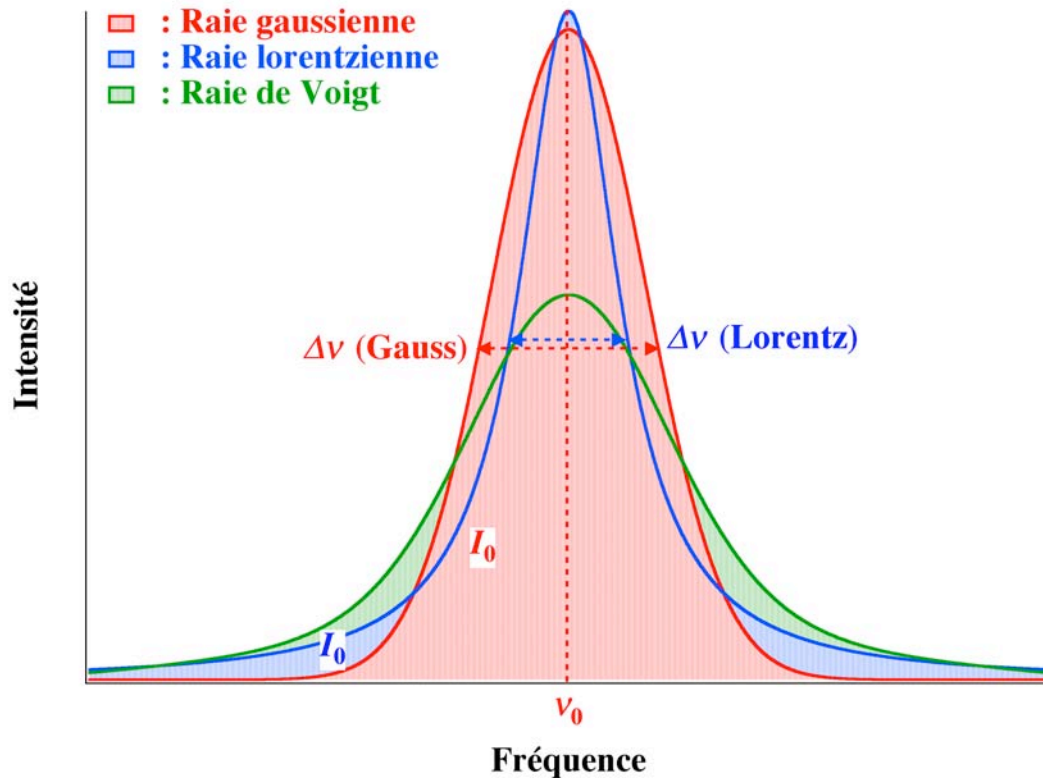
Les collisions entre molécules, dues à la pression du gaz, modifient également les vitesses, cette fois-ci selon une distribution de forme *lorentzienne* (du nom du physicien néerlandais Hendrik Antoon Lorentz, 1853–1828), d'où un profil de raie lorentzien,

$$I(\nu) = \frac{2I_0}{\pi \Delta \nu \left(1 + \left(\frac{2(\nu - \nu_0)}{\Delta \nu} \right)^2 \right)},$$

où $\Delta \nu$ dépend de la pression du gaz.

IX.4 Le profil de raie et les informations qu'il procure

La figure ci-dessous illustre la différence entre les profils gaussien, lorentzien et de Voigt.



Une raie élargie à la fois par l'effet Doppler et les collisions a la forme d'une fonction appelée *profil de Voigt* (du nom du physicien allemand Woldemar Voigt, 1850–1919).

Il existe d'autres causes d'élargissement des raies spectrales (par exemples la présence de champs électriques ou magnétiques, ...).

L'étude des profils de raie à haute résolution est essentielle car elle permet de remonter aux conditions physiques des objets étudiés : température, pression, concentration des espèces chimiques, vitesse du vents, ...

X. Référence

Astronomical Spectroscopy, J. Tennyson, Imperial College Press, London, 2005.