

DANS LES PROGRAMMES de spécialité en vigueur dans le cycle terminal des lycées, la physique quantique prend une place plus modeste que par le passé. Sans vraiment la désigner comme telle, on retient essentiellement quelques idées fortes qui sont mises à contribution pour leur portée expérimentale : l'aspect ondulatoire / corpusculaire de la lumière avec l'effet photoélectrique, la quantification du rayonnement et le photon, les mécanismes d'émission et d'absorption d'un rayonnement visible ou invisible, les niveaux d'énergie quantifiés d'un atome. Nous nous attacherons ici à illustrer ces deux derniers points. La physique des photodétecteurs n'est pas abordée dans cette fiche, tant ce domaine est riche d'applications pratiques qui méritent un traitement à part.

1. NIVEAUX D'ÉNERGIE D'UN ATOME : RUDIMENTS

Il existe peu de sites accessibles aux élèves pour proposer les rudiments de physique quantique. Il est donc à noter que le projet Khan Academy offre pour cette partie un accompagnement de qualité et en français pour les élèves désireux de [se former en ligne](#).

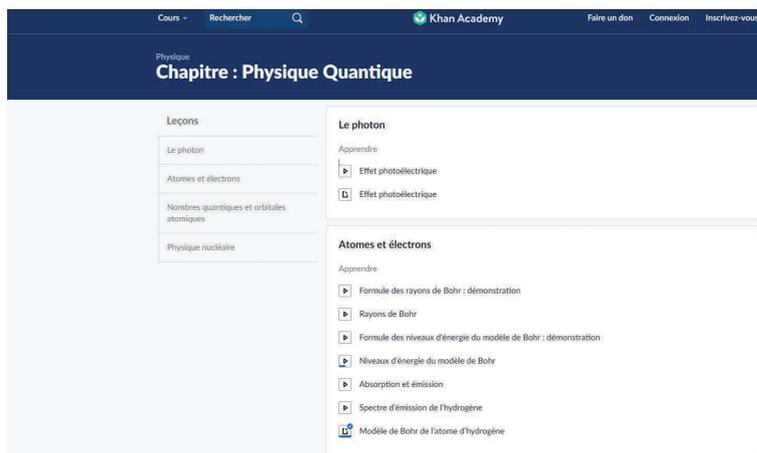


Figure 1 - Projet Khan Academy - Physique quantique.

Des physiciens du CNRS (Centre national de la recherche scientifique) et de l'Université de Paris ont réalisé un site web pour fournir aux enseignants du secondaire des éléments simples et des outils graphiques pour « montrer » la **quantique**. On peut notamment y télécharger en haute définition les vidéos illustrant quelques concepts

de base de la physique quantique. Le site est également destiné au grand public pour montrer les applications et les recherches associées à la physique quantique, et peut donc être suggéré aux élèves.



Figure 2 - Portail du site « Tout est quantique ».

2. NIVEAUX D'ÉNERGIE D'UN ATOME : DU BON USAGE D'UNE TABLE SPECTROSCOPIQUE

Pour les valeurs des énergies attachées aux niveaux quantifiés accessibles à un atome, qu'il soit neutre ou ionisé, un des problèmes majeurs auxquels on est confronté quand on parcourt les livres scolaires, c'est de s'assurer de la pertinence des données fournies.

Le seul modèle proposé aux élèves de lycée est le modèle « hydrogénoïde », mais on sait qu'il est difficilement transposable aux atomes comportant plusieurs électrons. Pour rendre compte des déterminations expérimentales des valeurs des niveaux d'énergie estimées à partir des mesures de longueurs d'onde des transitions observées, on élabore en spectroscopie des modèles complexes qui prennent en compte les différentes interactions qui surviennent dès que l'on s'attaque à un modèle d'atome comportant plusieurs électrons. Il en résulte des notations particulières, appelés « termes spectraux » qui rendent plus difficile l'identification des niveaux si l'on se contente du seul nombre quantique principal.

Il est quand même assez facile de s'assurer de la pertinence des valeurs des niveaux d'énergie d'un atome et des longueurs d'onde des radiations émises, en utilisant à bon escient les bases de données publiques établies en spectroscopie. Il en existe une qui est LA référence pour la spectroscopie, celle du NIST (National Institute of Standards and Technology) (cf. figure 3, page ci-contre).

2.1. Présentation de la base de données spectroscopiques du NIST

Toutes les bases de la spectroscopie sont détaillées selon le menu [Atomic Spectroscopy Info](#).

Atomic Spectra Database

NIST Standard Reference Database 78

Version 5.8

Last Update to Data Content: October 2020 | [Version History & Citation Information](#) | [Disclaimer](#) | DOI: <https://dx.doi.org/10.18434/T4W30F>

Welcome to the NIST Atomic Spectra Database, NIST Standard Reference Database #78. The spectroscopic data may be selected and displayed according to wavelengths or energy levels by choosing one of the following options:

LINES	Spectral lines and associated energy levels displayed in wavelength order with all selected spectra intermixed or in multiplet order. Transition probabilities for the lines are also displayed where available.
LEVELS	Energy levels of a particular atom or ion displayed in order of energy above the ground state.
GROUND STATES & IONIZATION ENERGIES	Ground states and ionization energies of atoms and atomic ions.
LIBS	ASD Interface for Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)

Additional information about the database may be obtained through the following links:

[Atomic Spectroscopy Intro](#) - Outlines basic atomic physics concepts, explains terminology and notation.

[ASD Intro & Contents](#) - Introduction to and contents of the Atomic Spectra Database.

Figure 3 - Portail de la base de données des spectres atomiques du NIST.

L'unité d'énergie de prédilection reste le cm^{-1} (!) lié au nombre d'onde $\sigma = \frac{1}{\lambda}$. Le facteur de conversion utile est le suivant : 1 eV correspond à $8\,065,544\,45(69) \text{ cm}^{-1}$. Pour les niveaux d'énergie d'un atome, la coutume est d'attribuer au niveau fondamental d'énergie la valeur « zéro » et aux niveaux les plus élevés celles relatives aux ionisations de l'atome (on s'intéresse en général au niveau sur lequel est porté l'atome pour sa première ionisation).

Si l'on veut garder une stratification des niveaux comme en cours de spécialité de première, il faut donc décaler vers le bas toutes les valeurs des niveaux en leur retranchant celle de première ionisation. Dans les formulaires de recherche, un atome neutre X est saisi X_I (ou _ désigne une espace à placer entre le symbole et le chiffre romain) ; ainsi Na I, désigne l'atome neutre de sodium. Un atome ionisé une fois sera noté X_II, ainsi de suite (par exemple : Na II désigne l'ion Na^+).

2.2. Exemple d'utilisation : le sodium Na I

Le menu *Levels* donne en centimètres (cm^{-1}) ou en électronvolts (eV) les niveaux d'énergie accessibles à l'atome ou ion étudié (cf. figure 4, page ci-après).

Sur la figure 5 (cf. page ci-après), on a extrait les valeurs des tout premiers niveaux de l'atome de sodium ainsi que celle qui correspond à l'énergie de première ionisation.

NIST Atomic Spectra Database Levels Form

Best viewed

This form provides access to NIST critically evaluated data on atomic energy levels.

Spectrum: Na I e.g., Fe I or Mg Li-like or Z=59 II or 198Hg I

Default Values Retrieve Data

Level Units: eV **Extended Search:** Set Additional

Format output: HTML (formatted) Set Additional

Display output: in its entirety

Page size: 15

Term ordered: term energy

Energy ordered:

Level information: Principal configuration
 Principal term
 Level Uncertainty
 J g
 Landé-g
 Leading percentages

Bibliographic references:

Level splitting:

T_e (eV) for partition function:

Default Values Retrieve Data

Figure 4 - Formulaire de recherche des valeurs de niveaux d'énergie d'un atome.

Configuration	Term	J	Level (eV)	Uncertainty (eV)
$2p^63s$	2S	$1/2$	0.00000000	
$2p^63p$	$^2P^o$	$1/2$	2.102297177	0.000000005
		$3/2$	2.104429202	0.000000006
$2p^64s$	2S	$1/2$	3.1913531	0.0000004
$2p^63d$	2D	$5/2$	3.61697081	0.00000025
		$3/2$	3.61697701	0.00000025
Na II ($2p^6\ ^1S_0$)	Limit	---	5.13907696	0.00000025

Figure 5 - Premiers niveaux d'énergie de l'atome de sodium et énergie de première ionisation.

Le menu *Lines* permet de connaître toutes les transitions possibles, dans cet exemple pour l'atome neutre de sodium. On peut n'explorer qu'une partie du spectre d'émission, ici comprise entre 500 et 600 nm, qui comporte dans cette bande un très grand nombre de transitions optiques entraînant l'émission de radiations visibles, dont le célèbre doublet jaune !

Figure 6 - Requête relative aux raies d'émission de l'atome de sodium.

Toutes les raies d'émission recensées ne sont pas observées avec la même probabilité. La colonne « intensité relative » permet ainsi de repérer les plus intenses. C'est le cas du doublet jaune du sodium qui, dans cette partie du spectre, constitue les raies d'émission les plus significatives.

Observed Wavelength Air (nm)	Unc. (nm)	Ritz Wavelength Air (nm)	Unc. (nm)	Rel. Int. (%)	A_{ul} (s ⁻¹)	Acc.	E_l (cm ⁻¹)	E_u (cm ⁻¹)	Lower Level Conf. Term, J	Upper Level Conf. Term, J
501.98	0.02	501.979	0.015				266 933.9	- 286 849.5	2p ² (³ P ^o) 3s3p(³ P ^o)	4p ²
504.04	0.02	504.940	0.015	270	4.1e+07	D	247 576.0	- 287 374.0	2p ² (¹ P ^o) 3s3p(³ P ^o)	4p ²
507.12	0.02	507.120	0.015				266 556.7	- 286 300.4	2p ² (¹ P ^o) 3s3p(¹ P ^o)	4p ²
510.96	0.02	510.917	0.015				247 252.3	- 286 849.5	2p ² (³ P ^o) 3s3p(¹ P ^o)	4p ²
514.55351	0.00005	514.55353	0.00005	1	1.14e+06	B+	16 936.17025	- 36 972.618	2p ² 3p	4p ²
515.34624	0.00005	515.34624	0.00005	2	2.27e+06	B+	16 973.36619	- 36 972.618	2p ² 3p	4p ²
516.15	0.02	516.212	0.015	83	1.5e+07	D	246 933.9	- 286 300.4	2p ² (³ P ^o) 3s3p(³ P ^o)	4p ²
525.64	0.02	525.669	0.014	7	2.e+06	D	247 252.3	- 286 300.4	2p ² (¹ P ^o) 3s3p(³ P ^o)	4p ²
541.10	0.04	541.051	0.023				246 897.4	- 287 374.0	2p ² (³ P ^o) 3s3p(³ P ^o)	4p ²
545.19	0.02	545.236	0.015				266 513.9	- 286 849.5	2p ² (³ P ^o) 3s3p(³ P ^o)	4p ²
546.64	0.03	546.68	0.03				269 086.5	- 287 374.0	2p ² (¹ P ^o) 3s3p(³ P ^o)	4p ²
556.99	0.09	556.883	0.019	42	1.8e+07	D	246 897.4	- 286 849.5	2p ² (¹ P ^o) 3s3p(¹ P ^o)	4p ²
562.10	0.02	562.065	0.016				265 513.9	- 286 300.4	2p ² (¹ P ^o) 3s3p(¹ P ^o)	4p ²
562.85	0.03	562.81	0.04				269 086.5	- 286 849.5	2p ² (¹ P ^o) 3s3p(¹ P ^o)	4p ²
568.24533	0.00005	568.24533	0.00006	5	1.01e+07	A	16 936.17025	- 34 548.764	2p ² 3p	4p ²
568.31934	0.00005	568.31933	0.00006	1	1.02e+06	A	16 973.36619	- 34 548.764	2p ² 3p	4p ²
568.82046	0.00005	568.82047	0.00006	9	1.21e+07	A	16 973.36619	- 34 548.729	2p ² 3p	4p ²
574.42	0.02	574.454	0.017	12	4.e+06	D	246 897.4	- 286 300.4	2p ² (¹ P ^o) 3s3p(¹ P ^o)	4p ²
588.995395	0.000003	588.995394	0.000003	80000	6.16e+07	AA	0.00000	- 16 973.36619	2p ² 3s	4p ²
589.592424	0.000003	589.592424	0.000003	40000	6.14e+07	AA	0.00000	- 16 856.17028	2p ² 3s	4p ²

Figure 7 - Raies d'émission du sodium dans la partie du spectre visible s'étalant de 500 nm à 600 nm

Extrayons le doublet jaune du sodium

Il y a deux raies d'émission à 588,995 nm et 589,592 nm pour des transitions

s'opérant entre les niveaux $2p^63p$ et $2p^63s$ (niveau fondamental). Les niveaux excités ont pour valeur $16\,973,366\,19$ et $16\,956,170\,25\text{ cm}^{-1}$ soit encore : $2,104\text{ eV}$ et $2,102\text{ eV}$, valeurs qui sont aussi celles données dans la base *Levels*. Et donc pour nos élèves, on aurait :

◆ niveau fondamental : $E_1 = -5,139\text{ eV}$,

◆ premiers niveaux excités :

$$E_2 = (2,102 - 5,139) = -3,037\text{ eV} \quad \text{et} \quad E_3 = (2,104 - 5,139) = -3,035\text{ eV}.$$

Ce sont les transitions notées en spectroscopie par les termes spectraux $2P_{3/2}$ et $2P_{1/2}$ vers $2S_{1/2}$ que l'on note parfois $3P_{3/2}$ et $3P_{1/2}$ vers $3S_{1/2}$ et qui, dans le modèle à couches et sous-couches que l'on présente aux élèves de spécialité, correspondent aux transitions de l'électron externe de l'état excité $3p$ vers l'état $3s$.

2.3. En conclusion

Par ces tables, il est donc relativement aisé de déterminer, pour un élément chimique donné, l'ensemble des radiations émises dans le visible, mais aussi dans l'ultraviolet et l'infrarouge, en extrayant leurs longueurs d'onde (considérées dans l'air pour celles comprises en particulier dans le visible) avec une grande précision tout en leur associant les énergies des états entre lesquels s'opèrent ces transitions. Se pose alors l'estimation de l'indice de l'air qui se doit être la plus précise possible ; le **NIST** procède ainsi. Lire en particulier la section suivante sur cette page : « Conversion between air and vacuum wavelengths ».

3. VU DANS LE BUP : QUANTIQUE

Dans cette rubrique, nous citons quelques articles récents du *Bup* qui apportent un éclairage utile sur l'histoire et les fondements de la quantique. Nous n'avons retenu que les articles qui nous paraissent les plus accessibles à un public non spécialiste et, si possible, les moins calculatoires.

Chaque article sélectionné est référencé, avec un court résumé de présentation.

◆ Bernard Pourprix, « Comprend-on vraiment la physique quantique ? », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 114, n° 1023, p. 343-356, avril 2020.

« Personne ne comprend vraiment la physique quantique », écrivait le physicien Richard Feynman en 1965. À toutes les étapes de sa construction, et malgré ses succès pratiques considérables, la physique quantique est toujours apparue mystérieuse, même aux yeux des physiciens spécialistes. De nos jours, on continue de s'interroger sur ses principes fondamentaux. La transition entre quantique et classique est encore un sujet de recherche. Toutefois, il est incontestable que la manipulation de particules individuelles permet aujourd'hui une meilleure maîtrise intellectuelle et technologique du monde quantique.

◆ Claude Cohen-Tannoudji, « Manipuler les atomes au moyen de la lumière », *Bull.*

Un. Prof. Phys. Chim., vol. 112, n° 1000, p. 235-237, janvier 2018.

Comprendre les interactions électromagnétiques qui sont à l'origine de l'émission et de l'absorption de lumière par les atomes a toujours été une préoccupation essentielle de la physique et a débouché sur l'élaboration d'une nouvelle mécanique, la mécanique quantique, qui a transformé notre représentation du monde microscopique. L'étude, de plus en plus précise, de la lumière émise et absorbée par les atomes est devenue ainsi une source essentielle d'informations sur la structure et la dynamique de ces systèmes, sur les milieux dans lesquels ils sont plongés, parfois aux confins de notre Univers.

- ◆ Belkacem Bouilil, « Pourquoi l'électron de l'atome d'hydrogène ne tombe-t-il pas sur le noyau ? », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 108, n° 964, p. 753-761, mai 2014. *Cet article présente deux approches tentant de justifier la stabilité de l'atome d'hydrogène. Le couplage entre le champ électromagnétique du vide et l'électron dans l'orbite de Bohr assure la stabilité du système : l'énergie rayonnée par l'électron, qui devrait le conduire à s'effondrer sur le noyau, est compensée par l'énergie qu'il absorbe des fluctuations du point zéro du vide, lui assurant ainsi de conserver son orbite stationnaire.*
- ◆ Richard Monvoisin, « Quantoc : l'art d'accommoder le mot quantique à toutes les sauces », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 105, n° 935, p. 679-700, juin 2011. *Dans cet article seront abordés sommairement quelques éléments des théories quantiques et de leurs avatars pseudo scientifiques, puis une série de concepts physiques plutôt malmenés. Nous aborderons le problème des surinterprétations dont ce domaine est l'objet, puis quelques exemples de détournements idéologiques pouvant avoir des conséquences graves. Enfin, nous tenterons de cerner des responsabilités, et il faudra se rendre à l'évidence que les médias de vulgarisation jouent hélas un rôle non négligeable dans la diffusion de pseudo-informations.*
- ◆ Bernard Pourprix, « La naissance de la physique quantique : rupture et continuité », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 104, n° 928, p. 1037-1050, novembre 2010. *La physique quantique paraît aujourd'hui en rupture totale avec la physique classique, et l'on est tenté de croire que les premiers acteurs de cette révolution scientifique ont tout de suite renoncé aux anciens modes de pensée. Il n'en est rien. La physique quantique n'est pas une création soudaine, sortie du néant. Elle est née, aux confins de la science classique, des efforts obstinés d'exploration des interactions rayonnement-matière. Le but de cet article est de discuter quelques idées reçues. Max Planck, en 1900, découvre-t-il vraiment les quanta ? Albert Einstein, en 1905, est-il le promoteur d'une vision radicalement nouvelle du monde microscopique ? Niels Bohr, dans les années 1910-1925, parvient-il à une description quantique des phénomènes atomiques en rompant d'emblée avec les conceptions classiques ?*
- ◆ Gaël Stevens, « La mécanique quantique et la notion de réalité », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 104, n° 924, p. 533-546, mai 2010. *Les résultats de la mécanique quantique sont parfois difficiles à concevoir, même – et surtout – lorsqu'ils s'expriment clairement : ils semblent déconnectés de notre réalité familière. Ils nous invitent à cette occasion à réfléchir sur la portée de la physique elle-même, et notamment sur sa capacité à expliquer la réalité. Cet article se propose de revenir sur les principales singularités qu'a introduites la physique quantique par rapport à la physique classique, pour ensuite*

examiner les tentatives d'explication et les différentes interprétations avancées pour essayer de recoller à la réalité.

- ◆ Alain Aspect et Philippe Grangier, « Des intuitions d'Einstein à l'information quantique : les stupéfiantes propriétés de l'intrication », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 99, n° 875, p. 33-39, juin 2005.
En 1935, dans un article célèbre, Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen introduisent la notion d'état intriqué, dans lequel deux particules présentent des corrélations fortes même si elles sont très éloignées. Ils en concluent que le formalisme quantique doit être complété, ce que Niels Bohr conteste aussitôt. Il faudra attendre presque trente ans pour que John Bell montre que ces points de vue contradictoires conduisent en fait à des prédictions discriminables quantitativement à l'aide d'inégalités. Réalisées à partir des années 1970, des expériences de plus en plus précises, utilisant des paires de photons intriqués, ont donné raison à Niels Bohr.
- ◆ Jean-Claude Boudenot et Gilles Cohen-Tannoudji, « Max Planck et la naissance de la mécanique quantique », *Bull. Un. Phys.*, vol. 95, n° 831, p. 349-359, février 2001.
Max Planck représente à la fois le couronnement de la physique classique et la naissance d'un Nouveau Monde : le monde quantique. En 1900, son article sur le rayonnement du corps noir est le déclencheur de l'une des plus grandes révolutions scientifiques de tous les temps. Les trente années qui suivent sont les plus riches de la physique ; Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Arnold Sommerfeld, Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Paul Dirac, Max Born, Wolfgang Pauli... reconstruisent la physique sur de nouvelles bases sur fond de conflit des générations. On retrace dans cet article la chronologie des événements scientifiques tels que Max Planck les a vécus en les replaçant dans leurs contextes politique et social.
- ◆ UdPPC-Rédaction et SFP-Rédaction, « Le laser : 50 ans de découvertes », série de quinze articles, *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 104, n° 927, p. 4-91, octobre 2010.
*Le laser a cinquante ans. Suite à la première démonstration d'un effet laser par Theodore Maiman en mai 1960, les lasers ont connu un développement exponentiel : les sources se sont développées dans tous les domaines de longueur d'onde, établissant des records de monochromaticité, de cohérence spatiale et de pureté spectrale, de durée ultracourte d'impulsions lumineuses... Leurs applications ont été multiples en recherche fondamentale, dans l'industrie, dans les télécommunications, en métrologie, en biologie et médecine... À cause de ces nombreuses applications, le laser est devenu un élément de notre vie quotidienne. En tant que source lumineuse quasi idéale, il a aussi révolutionné l'enseignement des sciences physiques et de l'optique. Pour célébrer les cinquante ans du laser, présenter les récentes avancées et décrire son impact dans les sciences physiques et ses nombreuses applications dans les autres disciplines, la Société française de physique et l'Union des professeurs de physique et de chimie ont uni leurs forces pour publier un numéro spécial commun de leurs revues respectives, *Reflets de la physique* et *Le Bup physique-chimie*.*
- ◆ J. Gillod, « L'effet photoélectrique et ses applications : journées d'étude de physique », *Bull. Un. Phys.*, vol. 40, n° 367-368-369 (2), p. 63-79, mai-juin-juillet 1948.
Une visite dans les archives du Bup qui s'avère passionnante : c'est une conférence donnée à la Sorbonne en 1948 qui présente toutes les particularités de l'effet photoélectrique, avec une de ses premières applications : la cellule à vide photoélectrique.