

Física del Plasma: Diagnósticos de Plasmas en Astrofísica y Fusión

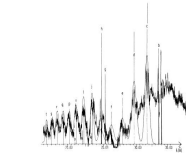


FIG. 1. Experimental spectrum of P9 in laser-produced plasma (the work), compared with theoretical UTA. The intensity of each array was adjusted to obtain the best fit. 10^{17} - 10^{18} cm^{-2} transitions: 4,5- Fe XXV ; 6,6- Fe XXVI ; 7,7- Fe XXVII ; 8,8- Fe XXVIII ; 9,9- Fe XXIX ; 10,10- Fe XXX ; 11,11- Fe XXXI ; 12,12- Fe XXXII ; 13,13- Fe XXXIII ; 14,14- Fe XXXIV ; 15,15- Fe XXXV ; 16,16- Fe XXXVI ; 17,17- Fe XXXVII ; 18,18- Fe XXXVIII ; 19,19- Fe XXXIX ; 20,20- Fe XL ; 21,21- Fe XLI ; 22,22- Fe XLII ; 23,23- Fe XLIII ; 24,24- Fe XLIV ; 25,25- Fe XLV ; 26,26- Fe XLVI ; 27,27- Fe XLVII ; 28,28- Fe XLVIII ; 29,29- Fe XLIX ; 30,30- Fe L ; 31,31- Fe LI ; 32,32- Fe LII ; 33,33- Fe LIII ; 34,34- Fe LIV ; 35,35- Fe LV ; 36,36- Fe LVI ; 37,37- Fe LVII ; 38,38- Fe LVIII ; 39,39- Fe LIX ; 40,40- Fe LX ; 41,41- Fe LXI ; 42,42- Fe LXII ; 43,43- Fe LXIII ; 44,44- Fe LXIV ; 45,45- Fe LXV ; 46,46- Fe LXVI ; 47,47- Fe LXVII ; 48,48- Fe LXVIII ; 49,49- Fe LXIX ; 50,50- Fe LXX ; 51,51- Fe LXXI ; 52,52- Fe LXXII ; 53,53- Fe LXXIII ; 54,54- Fe LXXIV ; 55,55- Fe LXXV ; 56,56- Fe LXXVI ; 57,57- Fe LXXVII ; 58,58- Fe LXXVIII ; 59,59- Fe LXXIX ; 60,60- Fe LXXX ; 61,61- Fe LXXXI ; 62,62- Fe LXXXII ; 63,63- Fe LXXXIII ; 64,64- Fe LXXXIV ; 65,65- Fe LXXXV ; 66,66- Fe LXXXVI ; 67,67- Fe LXXXVII ; 68,68- Fe LXXXVIII ; 69,69- Fe LXXXIX ; 70,70- Fe LXXXX ; 71,71- Fe LXXXXI ; 72,72- Fe LXXXXII ; 73,73- Fe LXXXXIII ; 74,74- Fe LXXXXIV ; 75,75- Fe LXXXXV ; 76,76- Fe LXXXXVI ; 77,77- Fe LXXXXVII ; 78,78- Fe LXXXXVIII ; 79,79- Fe LXXXXIX ; 80,80- Fe LXXXXX ; 81,81- Fe LXXXXXI ; 82,82- Fe LXXXXXII ; 83,83- Fe LXXXXXIII ; 84,84- Fe LXXXXXIV ; 85,85- Fe LXXXXXV ; 86,86- Fe LXXXXXVI ; 87,87- Fe LXXXXXVII ; 88,88- Fe LXXXXXVIII ; 89,89- Fe LXXXXXIX ; 90,90- Fe LXXXXXX ; 91,91- Fe LXXXXXXI ; 92,92- Fe LXXXXXXII ; 93,93- Fe LXXXXXXIII ; 94,94- Fe LXXXXXXIV ; 95,95- Fe LXXXXXXV ; 96,96- Fe LXXXXXXVI ; 97,97- Fe LXXXXXXVII ; 98,98- Fe LXXXXXXVIII ; 99,99- Fe LXXXXXXIX ; 100,100- Fe LXXXXXXX ; 101,101- Fe LXXXXXXXI ; 102,102- Fe LXXXXXXXII ; 103,103- Fe LXXXXXXXIII ; 104,104- Fe LXXXXXXXIV ; 105,105- Fe LXXXXXXXV ; 106,106- Fe LXXXXXXXVI ; 107,107- Fe LXXXXXXXVII ; 108,108- Fe LXXXXXXXVIII ; 109,109- Fe LXXXXXXXIX ; 110,110- Fe LXXXXXXXI ; 111,111- Fe LXXXXXXXII ; 112,112- Fe LXXXXXXXIII ; 113,113- Fe LXXXXXXXIV ; 114,114- Fe LXXXXXXXV ; 115,115- Fe LXXXXXXXVI ; 116,116- Fe LXXXXXXXVII ; 117,117- Fe LXXXXXXXVIII ; 118,118- Fe LXXXXXXXIX ; 119,119- Fe LXXXXXXXI ; 120,120- Fe LXXXXXXXII ; 121,121- Fe LXXXXXXXIII ; 122,122- Fe LXXXXXXXIV ; 123,123- Fe LXXXXXXXV ; 124,124- Fe LXXXXXXXVI ; 125,125- Fe LXXXXXXXVII ; 126,126- Fe LXXXXXXXVIII ; 127,127- Fe LXXXXXXXIX ; 128,128- Fe LXXXXXXXI ; 129,129- Fe LXXXXXXXII ; 130,130- Fe LXXXXXXXIII ; 131,131- Fe LXXXXXXXIV ; 132,132- Fe LXXXXXXXV ; 133,133- Fe LXXXXXXXVI ; 134,134- Fe LXXXXXXXVII ; 135,135- Fe LXXXXXXXVIII ; 136,136- Fe LXXXXXXXIX ; 137,137- Fe LXXXXXXXI ; 138,138- Fe LXXXXXXXII ; 139,139- Fe LXXXXXXXIII ; 140,140- Fe LXXXXXXXIV ; 141,141- Fe LXXXXXXXV ; 142,142- Fe LXXXXXXXVI ; 143,143- Fe LXXXXXXXVII ; 144,144- Fe LXXXXXXXVIII ; 145,145- Fe LXXXXXXXIX ; 146,146- Fe LXXXXXXXI ; 147,147- Fe LXXXXXXXII ; 148,148- Fe LXXXXXXXIII ; 149,149- Fe LXXXXXXXIV ; 150,150- Fe LXXXXXXXV ; 151,151- Fe LXXXXXXXVI ; 152,152- Fe LXXXXXXXVII ; 153,153- Fe LXXXXXXXVIII ; 154,154- Fe LXXXXXXXIX ; 155,155- Fe LXXXXXXXI ; 156,156- Fe LXXXXXXXII ; 157,157- Fe LXXXXXXXIII ; 158,158- Fe LXXXXXXXIV ; 159,159- Fe LXXXXXXXV ; 160,160- Fe LXXXXXXXVI ; 161,161- Fe LXXXXXXXVII ; 162,162- Fe LXXXXXXXVIII ; 163,163- Fe LXXXXXXXIX ; 164,164- Fe LXXXXXXXI ; 165,165- Fe LXXXXXXXII ; 166,166- Fe LXXXXXXXIII ; 167,167- Fe LXXXXXXXIV ; 168,168- Fe LXXXXXXXV ; 169,169- Fe LXXXXXXXVI ; 170,170- Fe LXXXXXXXVII ; 171,171- Fe LXXXXXXXVIII ; 172,172- Fe LXXXXXXXIX ; 173,173- Fe LXXXXXXXI ; 174,174- Fe LXXXXXXXII ; 175,175- Fe LXXXXXXXIII ; 176,176- Fe LXXXXXXXIV ; 177,177- Fe LXXXXXXXV ; 178,178- Fe LXXXXXXXVI ; 179,179- Fe LXXXXXXXVII ; 180,180- Fe LXXXXXXXVIII ; 181,181- Fe LXXXXXXXIX ; 182,182- Fe LXXXXXXXI ; 183,183- Fe LXXXXXXXII ; 184,184- Fe LXXXXXXXIII ; 185,185- Fe LXXXXXXXIV ; 186,186- Fe LXXXXXXXV ; 187,187- Fe LXXXXXXXVI ; 188,188- Fe LXXXXXXXVII ; 189,189- Fe LXXXXXXXVIII ; 190,190- Fe LXXXXXXXIX ; 191,191- Fe LXXXXXXXI ; 192,192- Fe LXXXXXXXII ; 193,193- Fe LXXXXXXXIII ; 194,194- Fe LXXXXXXXIV ; 195,195- Fe LXXXXXXXV ; 196,196- Fe LXXXXXXXVI ; 197,197- Fe LXXXXXXXVII ; 198,198- Fe LXXXXXXXVIII ; 199,199- Fe LXXXXXXXIX ; 200,200- Fe LXXXXXXXI ; 201,201- Fe LXXXXXXXII ; 202,202- Fe LXXXXXXXIII ; 203,203- Fe LXXXXXXXIV ; 204,204- Fe LXXXXXXXV ; 205,205- Fe LXXXXXXXVI ; 206,206- Fe LXXXXXXXVII ; 207,207- Fe LXXXXXXXVIII ; 208,208- Fe LXXXXXXXIX ; 209,209- Fe LXXXXXXXI ; 210,210- Fe LXXXXXXXII ; 211,211- Fe LXXXXXXXIII ; 212,212- Fe LXXXXXXXIV ; 213,213- Fe LXXXXXXXV ; 214,214- Fe LXXXXXXXVI ; 215,215- Fe LXXXXXXXVII ; 216,216- Fe LXXXXXXXVIII ; 217,217- Fe LXXXXXXXIX ; 218,218- Fe LXXXXXXXI ; 219,219- Fe LXXXXXXXII ; 220,220- Fe LXXXXXXXIII ; 221,221- Fe LXXXXXXXIV ; 222,222- Fe LXXXXXXXV ; 223,223- Fe LXXXXXXXVI ; 224,224- Fe LXXXXXXXVII ; 225,225- Fe LXXXXXXXVIII ; 226,226- Fe LXXXXXXXIX ; 227,227- Fe LXXXXXXXI ; 228,228- Fe LXXXXXXXII ; 229,229- Fe LXXXXXXXIII ; 230,230- Fe LXXXXXXXIV ; 231,231- Fe LXXXXXXXV ; 232,232- Fe LXXXXXXXVI ; 233,233- Fe LXXXXXXXVII ; 234,234- Fe LXXXXXXXVIII ; 235,235- Fe LXXXXXXXIX ; 236,236- Fe LXXXXXXXI ; 237,237- Fe LXXXXXXXII ; 238,238- Fe LXXXXXXXIII ; 239,239- Fe LXXXXXXXIV ; 240,240- Fe LXXXXXXXV ; 241,241- Fe LXXXXXXXVI ; 242,242- Fe LXXXXXXXVII ; 243,243- Fe LXXXXXXXVIII ; 244,244- Fe LXXXXXXXIX ; 245,245- Fe LXXXXXXXI ; 246,246- Fe LXXXXXXXII ; 247,247- Fe LXXXXXXXIII ; 248,248- Fe LXXXXXXXIV ; 249,249- Fe LXXXXXXXV ; 250,250- Fe LXXXXXXXVI ; 251,251- Fe LXXXXXXXVII ; 252,252- Fe LXXXXXXXVIII ; 253,253- Fe LXXXXXXXIX ; 254,254- Fe LXXXXXXXI ; 255,255- Fe LXXXXXXXII ; 256,256- Fe LXXXXXXXIII ; 257,257- Fe LXXXXXXXIV ; 258,258- Fe LXXXXXXXV ; 259,259- Fe LXXXXXXXVI ; 260,260- Fe LXXXXXXXVII ; 261,261- Fe LXXXXXXXVIII ; 262,262- Fe LXXXXXXXIX ; 263,263- Fe LXXXXXXXI ; 264,264- Fe LXXXXXXXII ; 265,265- Fe LXXXXXXXIII ; 266,266- Fe LXXXXXXXIV ; 267,267- Fe LXXXXXXXV ; 268,268- Fe LXXXXXXXVI ; 269,269- Fe LXXXXXXXVII ; 270,270- Fe LXXXXXXXVIII ; 271,271- Fe LXXXXXXXIX ; 272,272- Fe LXXXXXXXI ; 273,273- Fe LXXXXXXXII ; 274,274- Fe LXXXXXXXIII ; 275,275- Fe LXXXXXXXIV ; 276,276- Fe LXXXXXXXV ; 277,277- Fe LXXXXXXXVI ; 278,278- Fe LXXXXXXXVII ; 279,279- Fe LXXXXXXXVIII ; 280,280- Fe LXXXXXXXIX ; 281,281- Fe LXXXXXXXI ; 282,282- Fe LXXXXXXXII ; 283,283- Fe LXXXXXXXIII ; 284,284- Fe LXXXXXXXIV ; 285,285- Fe LXXXXXXXV ; 286,286- Fe LXXXXXXXVI ; 287,287- Fe LXXXXXXXVII ; 288,288- Fe LXXXXXXXVIII ; 289,289- Fe LXXXXXXXIX ; 290,290- Fe LXXXXXXXI ; 291,291- Fe LXXXXXXXII ; 292,292- Fe LXXXXXXXIII ; 293,293- Fe LXXXXXXXIV ; 294,294- Fe LXXXXXXXV ; 295,295- Fe LXXXXXXXVI ; 296,296- Fe LXXXXXXXVII ; 297,297- Fe LXXXXXXXVIII ; 298,298- Fe LXXXXXXXIX ; 299,299- Fe LXXXXXXXI ; 300,300- Fe LXXXXXXXII ; 301,301- Fe LXXXXXXXIII ; 302,302- Fe LXXXXXXXIV ; 303,303- Fe LXXXXXXXV ; 304,304- Fe LXXXXXXXVI ; 305,305- Fe LXXXXXXXVII ; 306,306- Fe LXXXXXXXVIII ; 307,307- Fe LXXXXXXXIX ; 308,308- Fe LXXXXXXXI ; 309,309- Fe LXXXXXXXII ; 310,310- Fe LXXXXXXXIII ; 311,311- Fe LXXXXXXXIV ; 312,312- Fe LXXXXXXXV ; 313,313- Fe LXXXXXXXVI ; 314,314- Fe LXXXXXXXVII ; 315,315- Fe LXXXXXXXVIII ; 316,316- Fe LXXXXXXXIX ; 317,317- Fe LXXXXXXXI ; 318,318- Fe LXXXXXXXII ; 319,319- Fe LXXXXXXXIII ; 320,320- Fe LXXXXXXXIV ; 321,321- Fe LXXXXXXXV ; 322,322- Fe LXXXXXXXVI ; 323,323- Fe LXXXXXXXVII ; 324,324- Fe LXXXXXXXVIII ; 325,325- Fe LXXXXXXXIX ; 326,326- Fe LXXXXXXXI ; 327,327- Fe LXXXXXXXII ; 328,328- Fe LXXXXXXXIII ; 329,329- Fe LXXXXXXXIV ; 330,330- Fe LXXXXXXXV ; 331,331- Fe LXXXXXXXVI ; 332,332- Fe LXXXXXXXVII ; 333,333- Fe LXXXXXXXVIII ; 334,334- Fe LXXXXXXXIX ; 335,335- Fe LXXXXXXXI ; 336,336- Fe LXXXXXXXII ; 337,337- Fe LXXXXXXXIII ; 338,338- Fe LXXXXXXXIV ; 339,339- Fe LXXXXXXXV ; 340,340- Fe LXXXXXXXVI ; 341,341- Fe LXXXXXXXVII ; 342,342- Fe LXXXXXXXVIII ; 343,343- Fe LXXXXXXXIX ; 344,344- Fe LXXXXXXXI ; 345,345- Fe LXXXXXXXII ; 346,346- Fe LXXXXXXXIII ; 347,347- Fe LXXXXXXXIV ; 348,348- Fe LXXXXXXXV ; 349,349- Fe LXXXXXXXVI ; 350,350- Fe LXXXXXXXVII ; 351,351- Fe LXXXXXXXVIII ; 352,352- Fe LXXXXXXXIX ; 353,353- Fe LXXXXXXXI ; 354,354- Fe LXXXXXXXII ; 355,355- Fe LXXXXXXXIII ; 356,356- Fe LXXXXXXXIV ; 357,357- Fe LXXXXXXXV ; 358,358- Fe LXXXXXXXVI ; 359,359- Fe LXXXXXXXVII ; 360,360- Fe LXXXXXXXVIII ; 361,361- Fe LXXXXXXXIX ; 362,362- Fe LXXXXXXXI ; 363,363- Fe LXXXXXXXII ; 364,364- Fe LXXXXXXXIII ; 365,365- Fe LXXXXXXXIV ; 366,366- Fe LXXXXXXXV ; 367,367- Fe LXXXXXXXVI ; 368,368- Fe LXXXXXXXVII ; 369,369- Fe LXXXXXXXVIII ; 370,370- Fe LXXXXXXXIX ; 371,371- Fe LXXXXXXXI ; 372,372- Fe LXXXXXXXII ; 373,373- Fe LXXXXXXXIII ; 374,374- Fe LXXXXXXXIV ; 375,375- Fe LXXXXXXXV ; 376,376- Fe LXXXXXXXVI ; 377,377- Fe LXXXXXXXVII ; 378,378- Fe LXXXXXXXVIII ; 379,379- Fe LXXXXXXXIX ; 380,380- Fe LXXXXXXXI ; 381,381- Fe LXXXXXXXII ; 382,382- Fe LXXXXXXXIII ; 383,383- Fe LXXXXXXXIV ; 384,384- Fe LXXXXXXXV ; 385,385- Fe LXXXXXXXVI ; 386,386- Fe LXXXXXXXVII ; 387,387- Fe LXXXXXXXVIII ; 388,388- Fe LXXXXXXXIX ; 389,389- Fe LXXXXXXXI ; 390,390- Fe LXXXXXXXII ; 391,391- Fe LXXXXXXXIII ; 392,392- Fe LXXXXXXXIV ; 393,393- Fe LXXXXXXXV ; 394,394- Fe LXXXXXXXVI ; 395,395- Fe LXXXXXXXVII ; 396,396- Fe LXXXXXXXVIII ; 397,397- Fe LXXXXXXXIX ; 398,398- Fe LXXXXXXXI ; 399,399- Fe LXXXXXXXII ; 400,400- Fe LXXXXXXXIII ; 401,401- Fe LXXXXXXXIV ; 402,402- Fe LXXXXXXXV ; 403,403- Fe LXXXXXXXVI ; 404,404- Fe LXXXXXXXVII ; 405,405- Fe LXXXXXXXVIII ; 406,406- Fe LXXXXXXXIX ; 407,407- Fe LXXXXXXXI ; 408,408- Fe LXXXXXXXII ; 409,409- Fe LXXXXXXXIII ; 410,410- Fe LXXXXXXXIV ; 411,411- Fe LXXXXXXXV ; 412,412- Fe LXXXXXXXVI ; 413,413- Fe LXXXXXXXVII ; 414,414- Fe LXXXXXXXVIII ; 415,415- Fe LXXXXXXXIX ; 416,416- Fe LXXXXXXXI ; 417,417- Fe LXXXXXXXII ; 418,418- Fe LXXXXXXXIII ; 419,419- Fe LXXXXXXXIV ; 420,420- Fe LXXXXXXXV ; 421,421- Fe LXXXXXXXVI ; 422,422- Fe LXXXXXXXVII ; 423,423- Fe LXXXXXXXVIII ; 424,424- Fe LXXXXXXXIX ; 425,425- Fe LXXXXXXXI ; 426,426- Fe LXXXXXXXII ; 427,427- Fe LXXXXXXXIII ; 428,428- Fe LXXXXXXXIV ; 429,429- Fe LXXXXXXXV ; 430,430- Fe LXXXXXXXVI ; 431,431- Fe LXXXXXXXVII ; 432,432- Fe LXXXXXXXVIII ; 433,433- Fe LXXXXXXXIX ; 434,434- Fe LXXXXXXXI ; 435,435- Fe LXXXXXXXII ; 436,436- Fe LXXXXXXXIII ; 437,437- Fe LXXXXXXXIV ; 438,438- Fe LXXXXXXXV ; 439,439- Fe LXXXXXXXVI ; 440,440- Fe LXXXXXXXVII ; 441,441- Fe LXXXXXXXVIII ; 442,442- Fe LXXXXXXXIX ; 443,443- Fe LXXXXXXXI ; 444,444- Fe LXXXXXXXII ; 445,445- Fe LXXXXXXXIII ; 446,446- Fe LXXXXXXXIV ; 447,447- Fe LXXXXXXXV ; 448,448- Fe LXXXXXXXVI ; 449,449- Fe LXXXXXXXVII ; 450,450- Fe LXXXXXXXVIII ; 451,451- Fe LXXXXXXXIX ; 452,452- Fe LXXXXXXXI ; 453,453- Fe LXXXXXXXII ; 454,454- Fe LXXXXXXXIII ; 455,455- Fe LXXXXXXXIV ; 456,456- Fe LXXXXXXXV ; 457,457- Fe LXXXXXXXVI ; 458,458- Fe LXXXXXXXVII ; 459,459- Fe LXXXXXXXVIII ; 460,460- Fe LXXXXXXXIX ; 461,461- Fe LXXXXXXXI ; 462,462- Fe LXXXXXXXII ; 463,463- Fe LXXXXXXXIII ; 464,464- Fe LXXXXXXXIV ; 465,465- Fe LXXXXXXXV ; 466,466- Fe LXXXXXXXVI ; 467,467- Fe LXXXXXXXVII ; 468,468- Fe LXXXXXXXVIII ; 469,469- Fe LXXXXXXXIX ; 470,470- Fe LXXXXXXXI ; 471,471- Fe LXXXXXXXII ; 472,472- Fe LXXXXXXXIII ; 473,473- Fe LXXXXXXXIV ; 474,474- Fe LXXXXXXXV ; 475,475- Fe LXXXXXXXVI ; 476,476- Fe LXXXXXXXVII ; 477,477- Fe LXXXXXXXVIII ; 478,478- Fe LXXXXXXXIX ; 479,479- Fe LXXXXXXXI ; 480,480- Fe LXXXXXXXII ; 481,481- Fe LXXXXXXXIII ; 482,482- Fe LXXXXXXXIV ; 483,483- Fe LXXXXXXXV ; 484,484- Fe LXXXXXXXVI ; 485,485- Fe LXXXXXXXVII ; 486,486- Fe LXXXXXXXVIII ; 487,487- Fe LXXXXXXXIX ; 488,488- Fe LXXXXXXXI ; 489,489- Fe LXXXXXXXII ; 490,490- Fe LXXXXXXXIII ; 491,491- Fe LXXXXXXXIV ; 492,492- Fe LXXXXXXXV ; 493,493- Fe LXXXXXXXVI ; 494,494- Fe LXXXXXXXVII ; 495,495- Fe LXXXXXXXVIII ; 496,496- Fe LXXXXXXXIX ; 497,497- Fe LXXXXXXXI ; 498,498- Fe LXXXXXXXII ; 499,499- Fe LXXXXXXXIII ; 500,500- Fe LXXXXXXXIV ; 501,501- Fe LXXXXXXXV ; 502,502- Fe LXXXXXXXVI ; 503,503- Fe LXXXXXXXVII ; 504,504- Fe LXXXXXXXVIII ; 505,505- Fe LXXXXXXXIX ; 506,506- Fe LXXXXXXXI ; 507,507- Fe LXXXXXXXII ; 508,508- Fe LXXXXXXXIII ; 509,509- Fe LXXXXXXXIV ; 510,510- Fe LXXXXXXXV ; 511,511- Fe LXXXXXXXVI ; 512,512- Fe LXXXXXXXVII ; 513,513- Fe LXXXXXXXVIII ; 514,514- Fe LXXXXXXXIX ; 515,515- Fe LXXXXXXXI ; 516,516- Fe LXXXXXXXII ; 517,517- Fe LXXXXXXXIII ; 518,518- Fe LXXXXXXXIV ; 519,519- Fe LXXXXXXXV ; 520,520- Fe LXXXXXXXVI ; 521,521- Fe LXXXXXXXVII ; 522,522- Fe LXXXXXXXVIII ; 523,523- Fe LXXXXXXXIX ; 524,524- Fe LXXXXXXXI ; 525,525- Fe LXXXXXXXII ; 526,526- Fe LXXXXXXXIII ; 527,527- Fe LXXXXXXXIV ; 528,528- Fe LXXXXXXXV ; 529,529- Fe LXXXXXXXVI ; 530,530- Fe LXXXXXXXVII ; 531,531- Fe LXXXXXXXVIII ; 532,532- Fe LXXXXXXXIX ; 533,533- Fe LXXXXXXXI ; 534,534- Fe LXXXXXXXII ; 535,535- Fe LXXXXXXXIII ; 536,536- Fe LXXXXXXXIV ; 537,537- Fe LXXXXXXXV ; 538,538- Fe LXXXXXXXVI ; 539,539- Fe LXXXXXXXVII ; 540,540- Fe LXXXXXXXVIII ; 541,541- Fe LXXXXXXXIX ; 542,542- Fe LXXXXXXXI ; 543,543- Fe LXXXXXXXII ; 544,544- Fe LXXXXXXXIII ; 545,545- Fe LXXXXXXXIV ; 546,546- Fe LXXXXXXXV ; 547,547- Fe LXXXXXXXVI ; 548,548- Fe LXXXXXXXVII ; 549,549- Fe LXXXXXXXVIII ; 550,550- Fe LXXXXXXXIX ; 551,551- Fe LXXXXXXXI ; 552,552- Fe LXXXXXXXII ; 553,553- Fe LXXXXXXXIII ; 554,554- Fe LXXXXXXXIV ; 555,555- Fe LXXXXXXXV ; 556,556- Fe LXXXXXXXVI ; 557,557- Fe LXXXXXXXVII ; 558,558- Fe LXXXXXXXVIII ; 559,559- Fe LXXXXXXXIX ; 560,560- Fe LXXXXXXXI ; 561,561- Fe LXXXXXXXII ; 562,562- Fe LXXXXXXXIII ; 563,563- $\text{Fe LXXXXXXX$

Basado en el curso dictado por Prof. J.L. Schwob
The Hebrew University of Jerusalem, Israel.

Programa del Curso

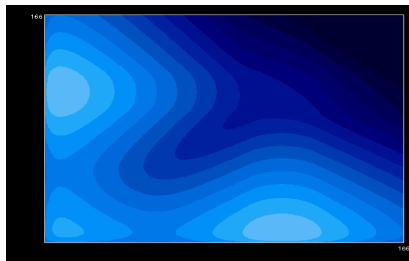
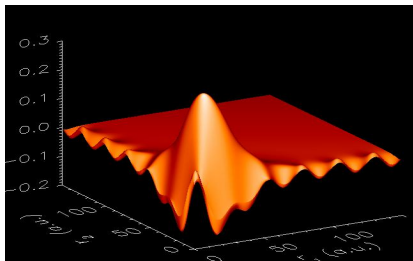
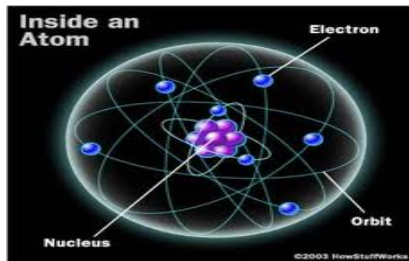
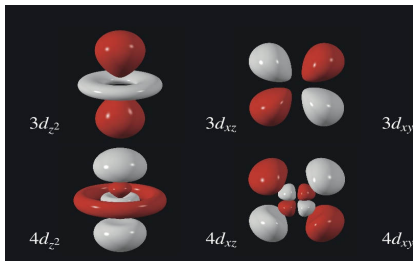
1. Física de Plasmas: Conceptos Generales
2. Fusión Termonuclear Controlada
3. Equilibrio Termodinámico
4. **Procesos fundamentales en Física Atómica**
5. Plasmas fuera del equilibrio termodinámico
6. Modelo Coronal
7. Modelo Colisional–Radiativo
8. Diagnóstico de Plasmas

Programa del Curso

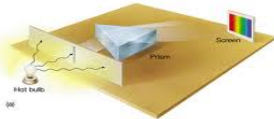
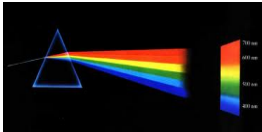
4. Procesos fundamentales en Física Atómica

- ▶ El átomo de Hidrógeno, estructura, niveles y transiciones
- ▶ Procesos radiativos
- ▶ Procesos colisionales
- ▶ Recombinación y Autoionización
- ▶ Métodos de aproximación y bases de datos

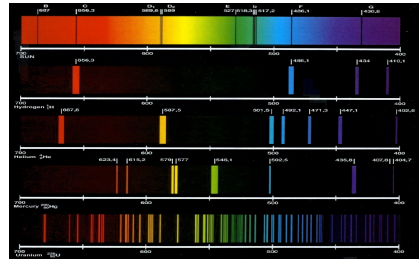
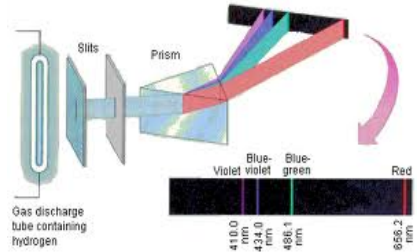
4. Física Atómica: Procesos Fundamentales



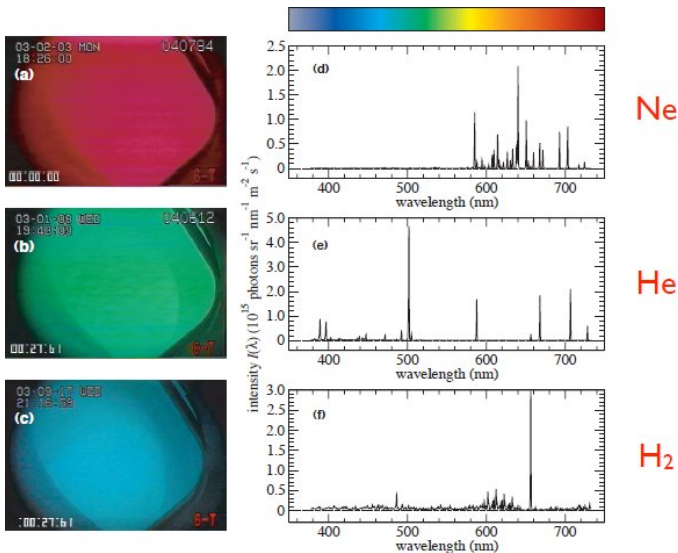
Líneas Espectrales



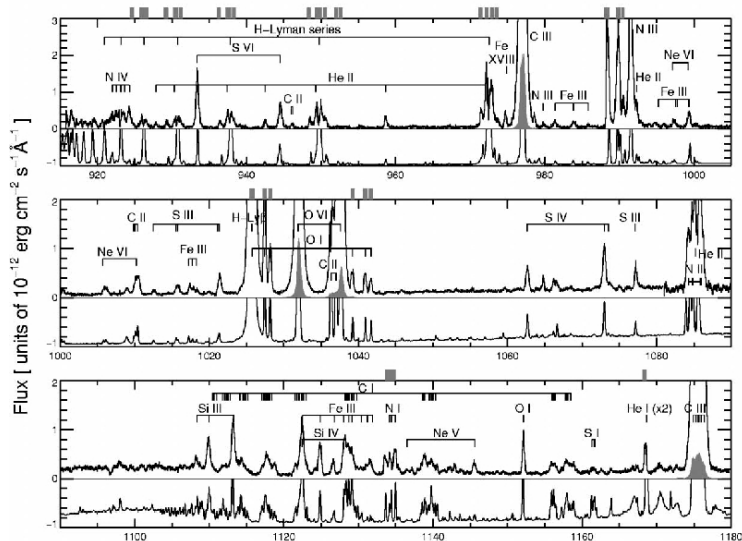
Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.



Líneas Espectrales



Capella



Líneas de Balmer

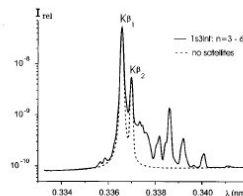
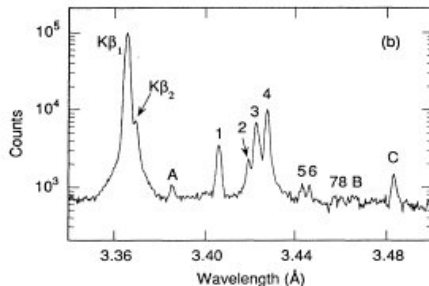
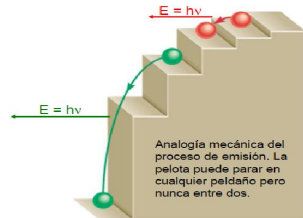
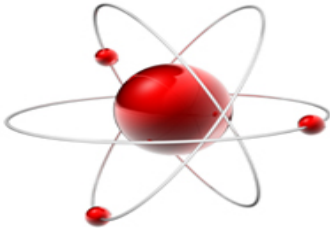
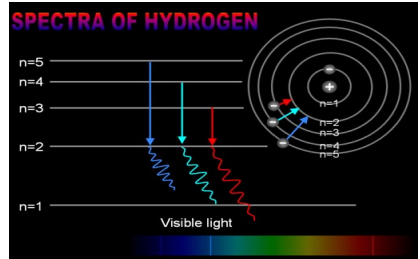


FIG. 3. Line overlapping of dielectronic Rydberg satellites $1s3lnl'$ with the $K\beta$ lines, $n_e = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $kT_e = 500 \text{ eV}$.

El Modelo de Bohr



El Atomo de Bohr

- Fuerza centrípeta: $\frac{m v_e^2}{r}$
- Fuerza Coulombiana: $\frac{Z e^2}{4 \pi \epsilon_0 r^2}$

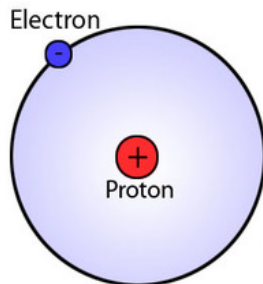
Hipótesis de Bohr:

$$L_n = m_e v r_n = n \frac{h}{2\pi} = n \hbar$$

$$r_n = \frac{n^2}{Z} \frac{h^2 \epsilon_0 4\pi}{\pi m_e e^2 4\pi} = \frac{n^2}{Z} \frac{\hbar^2 4\pi \epsilon_0}{m_e e^2}$$

$$r_n = \frac{n^2}{Z} a_0$$

$$a_0 = 5.2917 \times 10^{-11} \text{ m} = 0.52917 \text{ Å}$$



El Atomo de Bohr

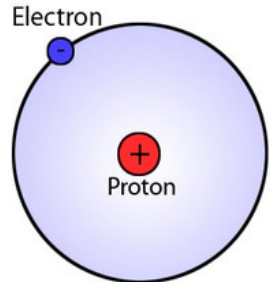
Hipótesis de Bohr:

$$L_n = m_e v r_n = n \frac{h}{2\pi} = n \hbar$$

$$\begin{aligned} v_n &= \frac{n\hbar}{m_e r_n} = \frac{Z}{n} \frac{e^2 c}{4\pi\epsilon_0 \hbar} \\ &= \frac{Z}{n} \frac{e^2}{\hbar c} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} c \end{aligned}$$

$$v_n = \frac{Z}{n} \alpha c$$

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = \frac{1}{137}$$



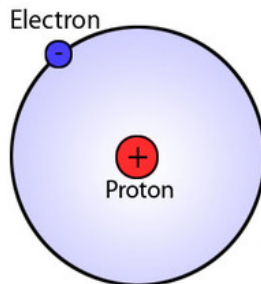
El Atomo de Bohr

Energía:

$$E = E_k + E_p$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$
$$E_p = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}$$

$$\Rightarrow E = -\frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r} = \frac{1}{2}E_p$$



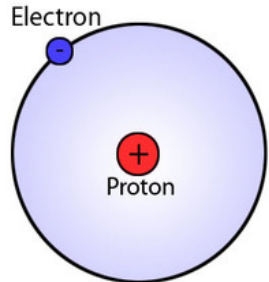
El Atomo de Bohr

Energía:

$$E = E_k + E_p$$

$$E_n = -\frac{1}{2} \frac{Z^2}{n^2} \frac{e^4 m c^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2 c^2}$$

$$E_n = -\frac{1}{2} \frac{Z^2}{n^2} \alpha^2 m_e c^2$$



$$m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$$

$$\frac{1}{2} \alpha^2 m_e c^2 = \frac{1}{2} E_H = \frac{1}{2} 27.2113845 \text{ eV} = 13.60569 \text{ eV}$$

Átomos hidrogenoides

- ▶ $r_n = \frac{n^2}{Z} a_0 \approx \frac{n^2}{Z} 0.5 \text{ Å}$
- ▶ $v_n = \frac{Z}{n} \alpha c$
- ▶ $E_n = -\frac{1}{2} \frac{Z^2}{n^2} \alpha^2 m_e c^2 \approx -13.6 \frac{Z^2}{n^2} \text{ eV}$

Unidades Atómicas

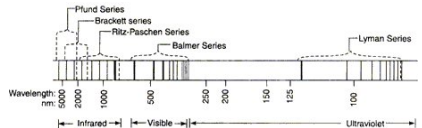
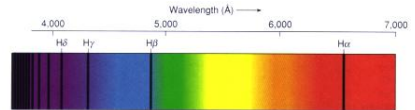
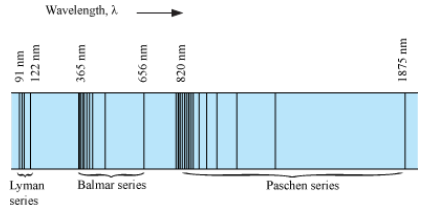
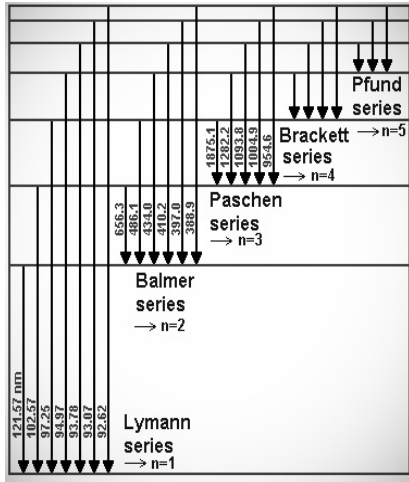
Una forma de simplificar las cuentas:

- ▶ $hc = 12398 \text{ eV } \text{\AA}$
- ▶ $\hbar c = 1974 \text{ eV } \text{\AA}$
- ▶ $m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$

Pero más fácil es aún trabajar en unidades atómicas ($m_e = \hbar = a_0 = 4\pi\epsilon_0 = 1$):

- ▶ $r_n = \frac{n^2}{Z}$
- ▶ $v_n = \frac{Z}{n}$
- ▶ $E_n = -\frac{1}{2} \frac{Z^2}{n^2}$

El Atomo de Bohr



La Ecuación de Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \hat{H} \Psi(\mathbf{r}, t)$$

Si el potencial V no depende del tiempo, se separa la solución

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = \phi(\mathbf{r}) \times f(t)$$

La **Ecuación de Schrödinger independiente del tiempo** queda:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \phi_n(\mathbf{r}) + V(\mathbf{r}) \phi_n(\mathbf{r}) = E_n \phi_n(\mathbf{r})$$

La Ecuación de Schrödinger en 1- d

si $\mathbf{r} = x$, entonces

La **Ecuación de Schrödinger unidimensional independiente del tiempo** queda:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \varphi_n(x) + V(x) \varphi_n(x) = E_n \varphi_n(x)$$

La Ecuación de Schrödinger

Si el potencial es central $V(\mathbf{r}) = V(r)$ se separa la solución espacial

$$\phi_n(\mathbf{r}) = \varphi_n(r) Y(\hat{r})$$

La **Ecuación de Schrödinger radial** queda:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\hbar^2}{2m} \frac{l(l+1)}{r^2} + V(r) \right] P_{nl}(r) = E_n(r) P_{nl}(r)$$

Donde

$$P_{nl}(r) \equiv r \varphi_{nl}(r) \quad \text{y} \quad \hat{L}^2 Y_l(\hat{r}) = l(l+1) \hbar^2 Y_l(\hat{r})$$

Atomo de Hidrógeno: Soluciones Angulares

Los **Armónicos Esféricos** están dados por

$$Y_{lm}(\theta, \phi) = (-1)^m \left[\frac{(2l+1)(l-m)!}{4\pi(l+m)!} \right]^{1/2} P_l^m(\cos \theta) e^{im\phi} \quad m \geq 0$$

$$Y_{l,-m}(\theta, \phi) = (-1)^m Y_{lm}^*(\theta, \phi)$$

y satisfacen las condiciones de ortonormalidad

$$\begin{aligned} \int Y_{l',m'}^*(\theta, \phi) Y_{lm}(\theta, \phi) &= \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi d\theta \sin \theta Y_{l',m'}^*(\theta, \phi) Y_{lm}(\theta, \phi) \\ &= \delta_{ll'} \delta_{mm'} \end{aligned}$$

Atomo de Hidrógeno: Soluciones Angulares

$$Y_0^0 = \frac{1}{2\sqrt{\pi}}$$

$$Y_1^1 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{\pi}} \sin \phi \sin \theta$$

$$Y_1^0 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{\pi}} \cos \theta$$

$$Y_1^{-1} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{\pi}} \cos \phi \sin \theta$$

$$Y_2^{-2} = \frac{\sqrt{15}}{2\sqrt{\pi}} \cos \phi \sin \phi \sin^2 \theta$$

$$Y_2^{-1} = \frac{\sqrt{15}}{2\sqrt{\pi}} \sin \phi \cos \theta \sin \theta$$

$$Y_2^0 = \frac{\sqrt{5}}{4\sqrt{\pi}} (3 \cos^2 \theta - 1)$$

$$Y_2^1 = \frac{\sqrt{15}}{2\sqrt{\pi}} \cos \phi \cos \theta \sin \theta$$

$$Y_2^2 = \frac{\sqrt{15}}{4\sqrt{\pi}} (\cos^2 \phi - \sin^2 \phi) \sin^2 \theta$$

$$Y_1^1 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{\pi}} y$$

$$Y_1^0 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{\pi}} z$$

$$Y_1^{-1} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{\pi}} x$$

$$Y_2^{-2} = \frac{\sqrt{15}}{2\sqrt{\pi}} xy$$

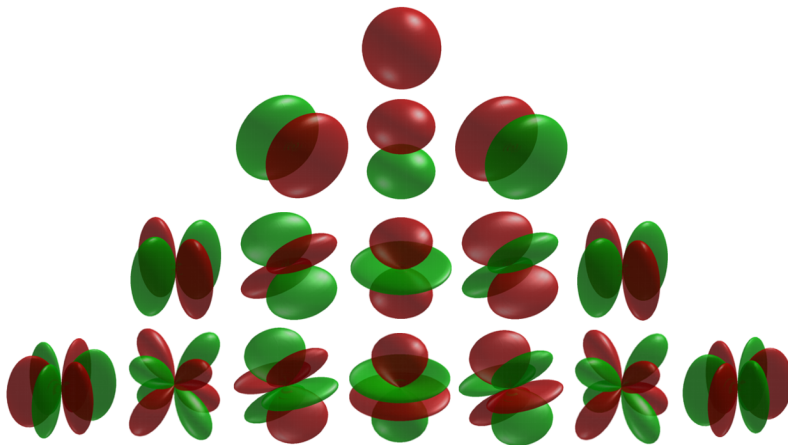
$$Y_2^{-1} = \frac{\sqrt{15}}{2\sqrt{\pi}} yz$$

$$Y_2^0 = \frac{\sqrt{5}}{4\sqrt{\pi}} (3z^2 - 1)$$

$$Y_2^1 = \frac{\sqrt{15}}{2\sqrt{\pi}} xz$$

$$Y_2^2 = \frac{\sqrt{15}}{4\sqrt{\pi}} (x^2 - y^2)$$

Atomo de Hidrógeno: Soluciones Angulares



Soluciones Angulares: Paridad

La transformación de **Paridad**

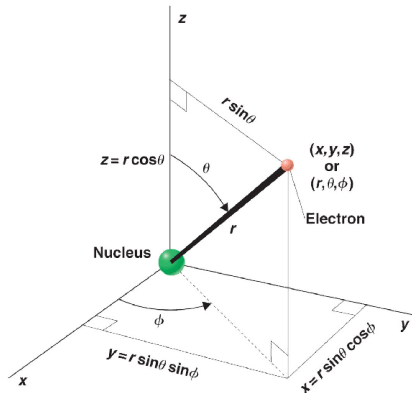
$(x \rightarrow -x; y \rightarrow -y; z \rightarrow -z)$, tiene la forma

$$r \rightarrow r$$

$$\theta \rightarrow \pi - \theta$$

$$\phi \rightarrow \phi + \pi$$

$$Y_{lm}(\pi - \theta, \phi + \pi) = (-1)^l Y_{lm}(\theta, \phi)$$



Copyright © 2006 Pearson Education, Inc., Publishing as Benjamin Cummings

La Ecuación de Schrödinger radial

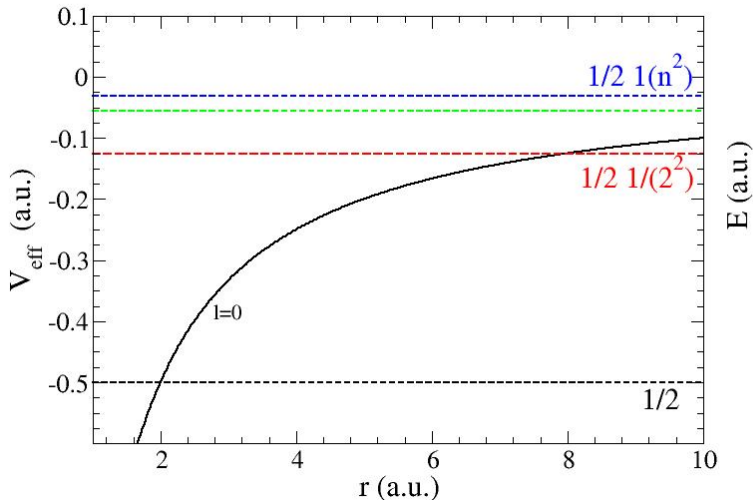
$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\hbar^2}{2m} \frac{l(l+1)}{r^2} + V(r) \right] P_{nl}(r) = E_n(r) P_{nl}(r)$$

se puede escribir como

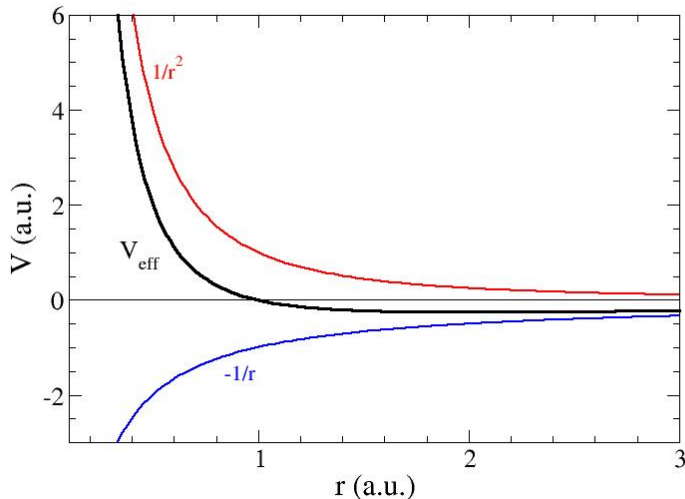
$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial r^2} + V_{\text{eff}}(r) \right] P_{nl}(r) = E_n(r) P_{nl}(r)$$

$$V_{\text{eff}}(r) = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{l(l+1)}{r^2} + V(r)$$

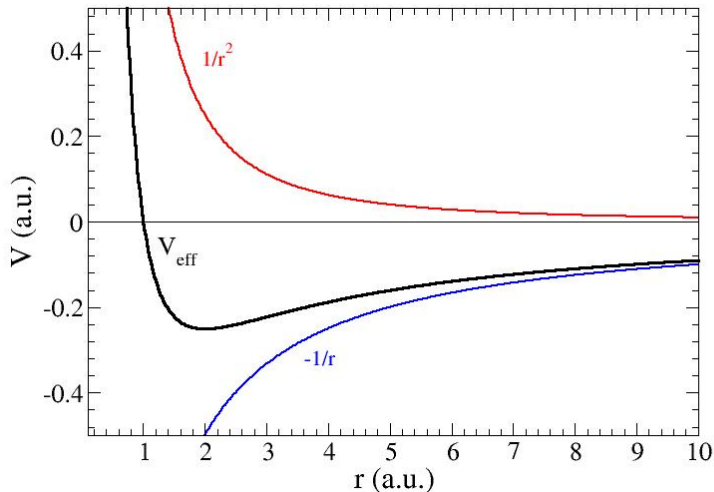
La Ecuación de Schrödinger radial



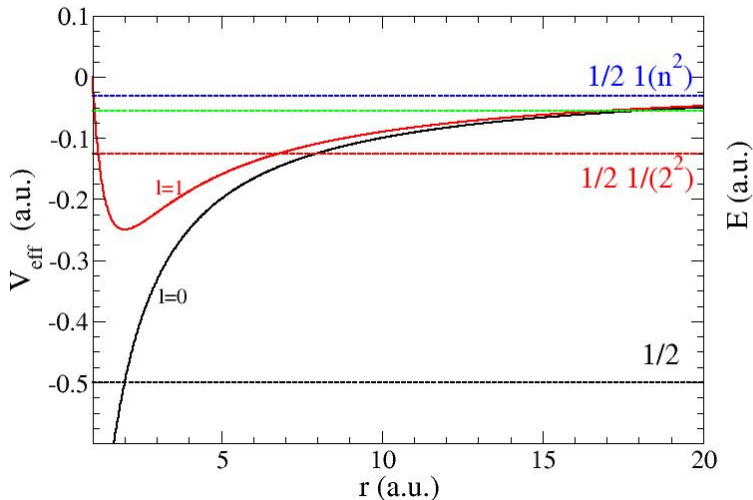
La Ecuación de Schrödinger radial



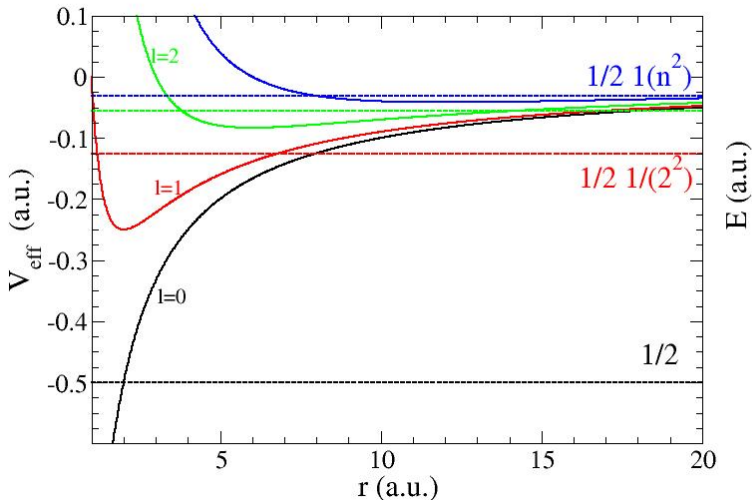
La Ecuación de Schrödinger radial



La Ecuación de Schrödinger radial



La Ecuación de Schrödinger radial



Atomo de Hidrógeno: Soluciones Radiales

Las **soluciones radiales reducidas** están dadas por

$$P_{nl}(r) = N_{nl} e^{-\rho/2} \rho^l L_{n+l}^{2l+1}(\rho)$$

donde $\rho \equiv \frac{2Z}{na_\mu} r$, $a_\mu = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{\mu e^2}$, y los polinomios de Laguerre

$$L_{n+l}^{2l+1}(\rho) = \sum_{k=0}^{n-l-1} (-1)^{k+1} \frac{[(n+l)!]^2}{(n-l-1-k)!(2l+1+k)!} \frac{\rho^k}{k!}$$

y el factor de normalización

$$N_{nl} = - \left\{ \left(\frac{2Z}{na_\mu} \right)^3 \frac{(n-l-1)!}{2n[(n+l)!]^3} \right\}^{1/2}$$

Incompatible con Mathematica !

Atomo de Hidrógeno: Soluciones Radiales

Las **soluciones radiales reducidas** están dadas por

$$P_{nl}(r) = N_{nl} e^{-\rho/2} \rho^l {}_1F_1(l+1-n, 2l+2, \rho)$$

$$\text{donde } \rho \equiv \frac{2Z}{na_\mu} r, \quad a_\mu = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{\mu e^2},$$

y el factor de normalización

$$N_{nl} = \frac{1}{(2l+1)!} \sqrt{\frac{\left(\frac{2Z}{na_\mu}\right)^3 (n+l)!}{2n(n-l-1)!}}$$

Atomo de Hidrógeno: Soluciones Radiales

$$R_{10} = 2 \left(\frac{Z}{a_0} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-Zr/a_0}$$

$$R_{21} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{Z}{2a_0} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{Zr}{a_0} \right) e^{-Zr/2a_0}$$

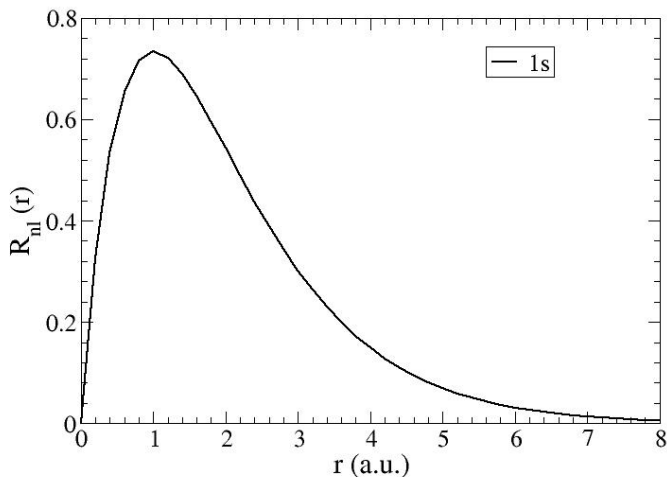
$$R_{20} = 2 \left(\frac{Z}{2a_0} \right)^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{Zr}{2a_0} \right) e^{-Zr/2a_0}$$

$$R_{32} = \frac{2\sqrt{2}}{27\sqrt{5}} \left(\frac{Z}{3a_0} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{Zr}{a_0} \right)^2 e^{-Zr/3a_0}$$

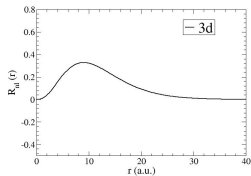
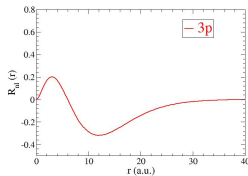
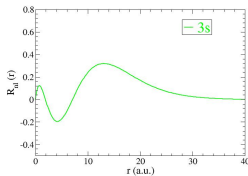
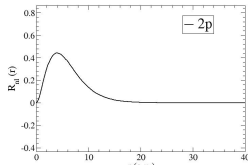
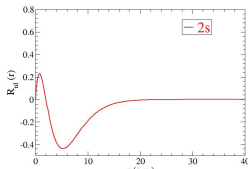
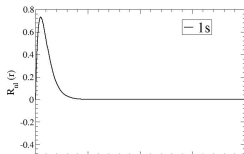
$$R_{31} = \frac{4\sqrt{2}}{3} \left(\frac{Z}{3a_0} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{Zr}{a_0} \right) \left(1 - \frac{Zr}{6a_0} \right) e^{-Zr/3a_0}$$

$$R_{30} = 2 \left(\frac{Z}{3a_0} \right)^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{2Zr}{3a_0} + \frac{2(Zr)^2}{27a_0^2} \right) e^{-Zr/3a_0}$$

Atomo de Hidrógeno: Soluciones Radiales



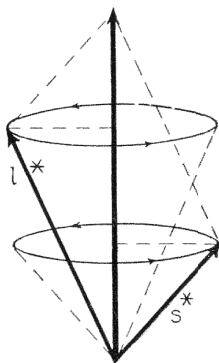
Atomo de Hidrógeno: Soluciones Radiales



Notación Espectroscópica

coupling of angular momentum

$$\mathbf{j}^* \quad j = l + s \quad (|s| = 1/2)$$



total angular momentum
quantum number

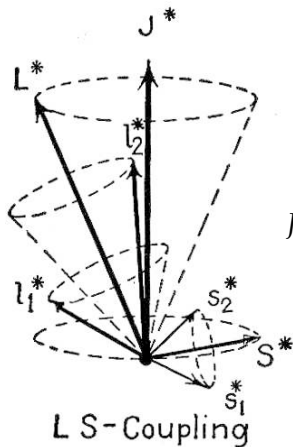
$$j = \begin{cases} l \pm \frac{1}{2} & \text{for } l \geq 1 \\ \frac{1}{2} & \text{for } l = 0 \end{cases}$$

each j state has $2j+1$ magnetic
substates m ($= -j, -j+1, \dots, j$)

(H. E. White, *Introduction to Atomic Spectra*)

(notas tomadas de Motoshi Goto)

L-S coupling



(H. E. White, *Introduction to Atomic Spectra*)

$$L = l_1 + l_2$$

$$S = s_1 + s_2$$

$$J = L + S$$

$$J = \begin{cases} L - S, \dots, L + S & \text{for } L \geq S \\ & (2S + 1 \text{ states}) \\ S - L, \dots, S + L & \text{for } L < S \\ & (2L + 1 \text{ states}) \end{cases}$$

each J state has $2J+1$ magnetic substates $M (= -J, -J+1, \dots, J)$

(notas tomadas de Motoshi Goto)

quantum numbers

variables	meanings	values	
n	principal	0, 1, 2, ...	
s	spin	1/2	
S		0, 1/2, 1, 3/2, 2, ...	
l	orbital	0, 1, 2, ...	s, p, d, f, ...
L			S, P, D, F, ...
j	total	0, 1/2, 1, 3/2, 2, ...	
J			
m	magnetic	0, $\pm 1/2$, ± 1 , $\pm 3/2$, ± 2 , ...	
M			

(notas tomadas de Motoshi Goto)

electron states for hydrogen

orbital angular momentum quantum number

$n \backslash l$	0	1	2	3	4	5
	s (2)	p (6)	d (10)	f (14)	g (18)	h (22)
principal quantum number	1 (2)	1s				
	2 (8)	2s	2p			
	3 (18)	3s	3p	3d		
	4 (32)	4s	4p	4d	4f	
	5 (50)	5s	5p	5d	5f	5g
	6 (72)	6s	6p	6d	6f	6g
						6h

spin quantum number $s = 1/2$

() indicates statistical weight

(notas tomadas de Motoshi Goto)

NIST SP 966 (September 2003)

Terminología

Denominación	Especificación	Peso Estadístico
Nivel Hidrogénico	n (degenerado en l)	$2n^2$
Configuración	n_i y l_i	
Término	n_i, l_i, L y S	$(2L + 1)(2S + 1)$
Nivel	n_i, l_i, L, S y J	$(2J + 1)$
Estado	n_i, l_i, L, S, J y M	1

term designation

$$nl^k n'l'^{k'} \dots {}^{2S+1}L_J$$

configuration	possible terms	isoelectronic sequence
3d	${}^2D_{3/2,5/2}$	H-like
1s4f	1F_3 ${}^3F_{2,3,4}$	He-like
$1s^2 2p$	${}^2P_{1/2,3/2}$	Li-like
$1s^2 2s^2$	1S_0	Be-like
$1s^2 2s 2p ({}^3P^o) 3p$	${}^2S_{1/2}$ ${}^2P_{1/2,3/2}$ ${}^2D_{3/2,5/2}$ ${}^4S_{3/2}$ ${}^4P_{1/2,3/2,5/2}$ ${}^4D_{1/2,3/2,5/2,7/2}$	B-like

one electronic configuration could have several terms

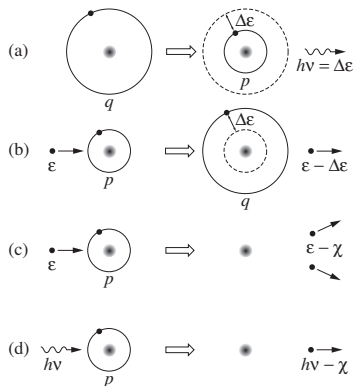
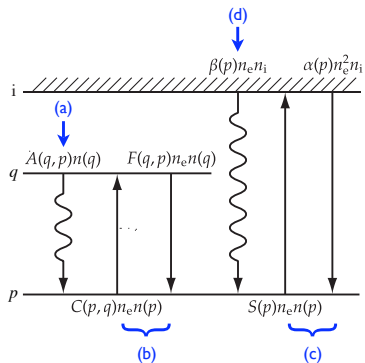
(notas tomadas de Motoshi Goto)

configuration		term(s)
$1s2s2p$ (Li-like)	$\Rightarrow$	$1s2s(^1S)2p\ ^2P_{1/2,3/2}$
		$1s2s(^3S)2p\ ^2P_{1/2,3/2}$
		$\quad\quad\quad\ ^4P_{1/2,3/2,5/2}$
$1s^22p^2$ (Be-like)	$\Rightarrow$	$^1S, ^1D, ^3P$

(notas tomadas de Motoshi Goto)

atomic processes

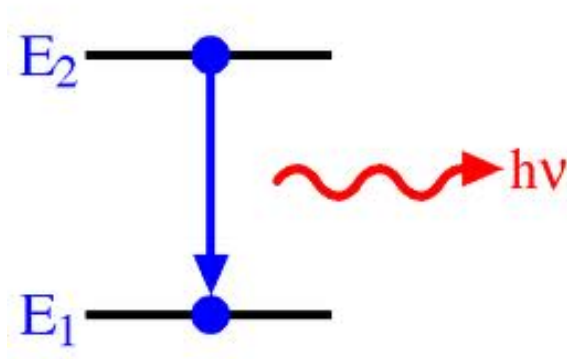
various processes should
be taken into consideration



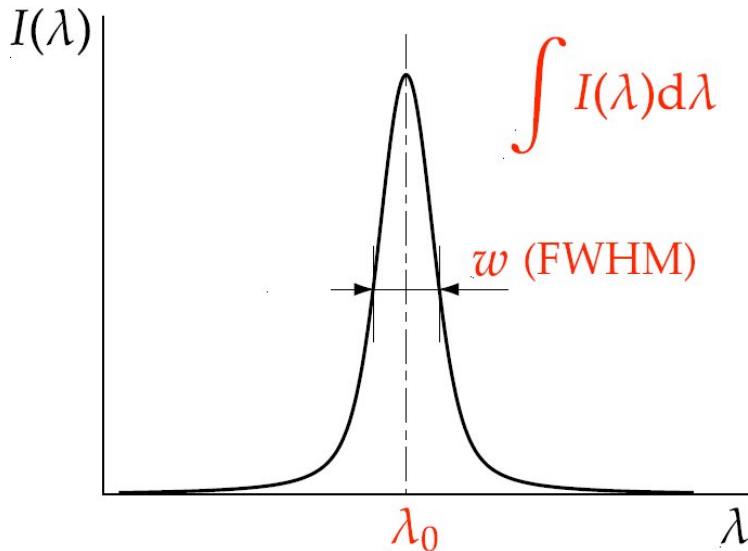
(notas tomadas de Motoshi Goto)

Procesos Radiativos

$$\hbar\omega_{21} = E_2 - E_1$$

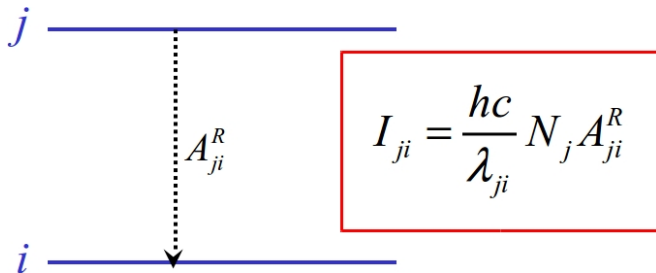


Propiedades de las líneas de emisión



Intensidad de línea

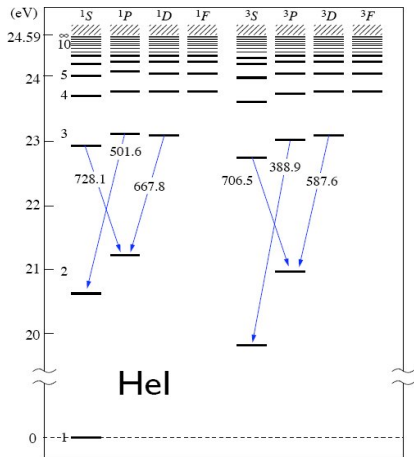
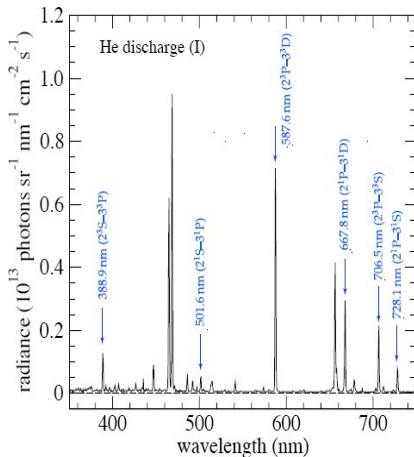
La Intensidad es el producto de la **densidad de población** por la probabilidad de transición (**coeficiente de Einstein**) A por la energía de la transición.



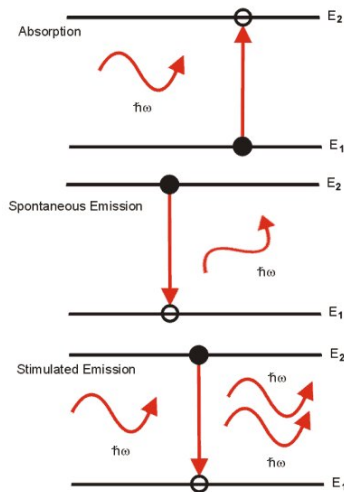
$$[A^R] = \text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$$

Coefficiente de Einstein

El coeficiente A es **constante** y propio de cada transición



Procesos Radiativos



Balance Detallado

Es la situación de equilibrio en la que cada proceso elemental está balanceado completamente por su reacción inversa (el mismo número de reacciones por tiempo por volumen).

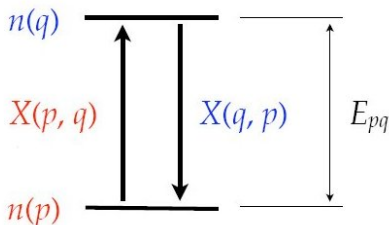
- ▶ En equilibrio termodinámico:

$$n(p) X(p, q) = n(q) X(q, p)$$

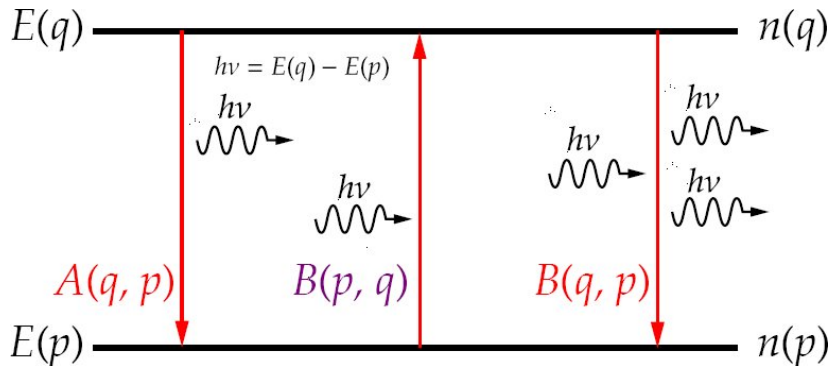
- ▶ En E.T., se cumple Boltzman

$$\frac{n_p}{n_q} = \frac{g_p}{g_q} e^{\frac{\Delta E_{pq}}{kT}}$$

- ▶ $X(q, p) = X(p, q) \frac{g_p}{g_q} e^{\frac{\Delta E_{pq}}{kT}}$



Coefficientes de Einstein



Balance Detallado

- ▶ En equilibrio termodinámico:

$$A(q, p) n(q) + B(q, p) n(q) \rho(\nu) = B(p, q) n(p) \rho(\nu)$$

- ▶ Boltzmann:

$$\frac{n_p}{n_q} = \frac{g_p}{g_q} e^{\frac{\Delta E_{pq}}{kT}}$$

$$\rho(\nu) = \frac{\frac{A(q,p)}{B(q,p)}}{\frac{B(p,q)}{B(q,p)} \frac{g(p)}{g(q)} \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

- ▶ La radiación en equilibrio es de **cuerpo negro**

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

- ▶ En frecuencia angular: $\rho(\omega) = \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1}$

Balance Detallado

Igualando :

$$\rho(\omega) = \frac{\frac{A(q,p)}{B(q,p)}}{\frac{B(p,q)}{B(q,p)} \frac{g(p)}{g(q)} \exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}$$

Se debe cumplir:

- ▶ $\frac{B(p,q)}{B(q,p)} \frac{g(p)}{g(q)} = 1$
- ▶ $\frac{A(q,p)}{B(q,p)} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3}$

Coefficiente de Emisión Espontánea

- ▶ Consideramos el Hamiltoniano (no-relativista)

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}' = \frac{\hat{p}^2}{2m} + \hat{H}'$$

- ▶ con una perturbación

$$\hat{H}' = E_0 \cos(\omega t)$$

Teoría de Perturbaciones: la tasa de transiciones entre un estado inicial i a uno final f :

$$R_{if} = B(i, f)\rho(\omega) = \frac{\pi}{3\epsilon_0\hbar^2} |M_{if}|^2 \rho(\omega)$$

- ▶ La matriz de transición dipolar es

$$M_{if} = \langle f | e \hat{r} | i \rangle \equiv e D_{if}$$

Detalles de aproximación dipolar

- ▶ El Hamiltoniano de una partícula en un campo

$$\hat{H} = \frac{(\hat{p} - q\hat{A}/c)^2}{2m} + q\phi$$

- ▶ En Coulomb gauge ($\vec{\nabla} \cdot \hat{A} = 0 \Rightarrow [\hat{A}, \hat{p}] = 0$):

$$\hat{H}_0 = \frac{\hat{p}^2}{2m} - e\phi \quad \hat{H}_1 = \frac{e\hat{p} \cdot \hat{A}}{m_e c} + \frac{e^2}{2m_e c^2} \hat{A} \cdot \hat{A}$$

- ▶ Aproximación dipolar: $\hat{A} = \vec{\epsilon} e^{-i\vec{k} \cdot \vec{r}} \approx \vec{\epsilon}$

- ▶ $M_{fi} = \frac{e}{m_e c} \langle f | \hat{p} \cdot \hat{A} | i \rangle \approx \frac{e}{m_e c} \vec{\epsilon} \langle f | \hat{p} | i \rangle$

- ▶ $\langle f | \hat{p} | i \rangle = m \langle f | \frac{d\hat{r}}{dt} | i \rangle = m \frac{i}{\hbar} \langle f | [\hat{H}, \hat{r}] | i \rangle$

- ▶ $\langle f | [\hat{H}, \hat{r}] | i \rangle = (E_f - E_i) \langle f | \hat{r} | i \rangle$

$$M_{fi} = i \frac{e}{c} \omega_{if} \langle f | \vec{\epsilon} \cdot \hat{r} | i \rangle$$

Coefficiente de Emisión Espontánea

- ▶ $A_{ji} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} B_{ji}$
- ▶ $B_{ij} = \frac{\pi}{\epsilon_0 \hbar^2} |e D_{ij}|^2$

Reemplazando (suponiendo isotrópico)

$$A_{ji} = \frac{32\pi^3}{3} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar} \left(\frac{1}{\lambda}\right)^3 |\langle \psi_i(\mathbf{r}) | \mathbf{z} | \psi_j(\mathbf{r}) \rangle|^2$$

- ▶ Con λ en nm:

$$A_{ji} = 2.026 \times 10^{15} \frac{1}{\lambda^3} |Z_{ij}|^2$$

- ▶ (Práctica):

Suponiendo $E = \frac{Z^2}{2} \alpha^2 m_e c^2$, y usando $\frac{mc}{\hbar} = \frac{1}{a_0 \alpha}$ y

τ (a.u.) = 2.4189×10^{-17} s:

$$\Rightarrow A \approx \frac{Z^4}{2} \alpha^3 \approx Z^4 10^{10} \text{ s}^{-1}.$$

Reglas de Selección (dipolar)

1. $\sum_i \Delta l_i = \pm 1$ (cambio de paridad)
2. $\Delta L = \pm 1, 0$ ($0 \rightarrow 0$ excluída)
3. $\Delta J = \pm 1, 0$ ($0 \rightarrow 0$ excluída)
4. $\Delta S = 0$
5. $\Delta M = 0, \pm 1$

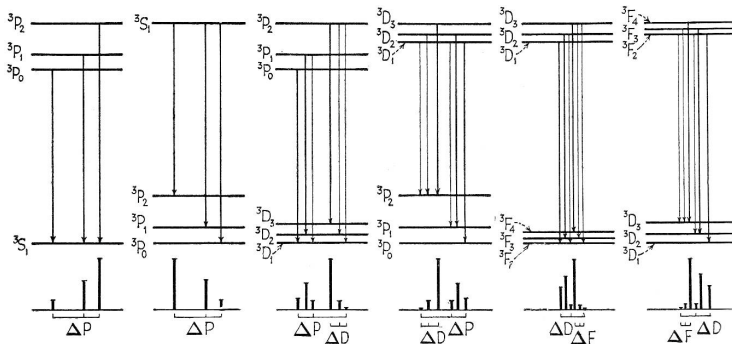
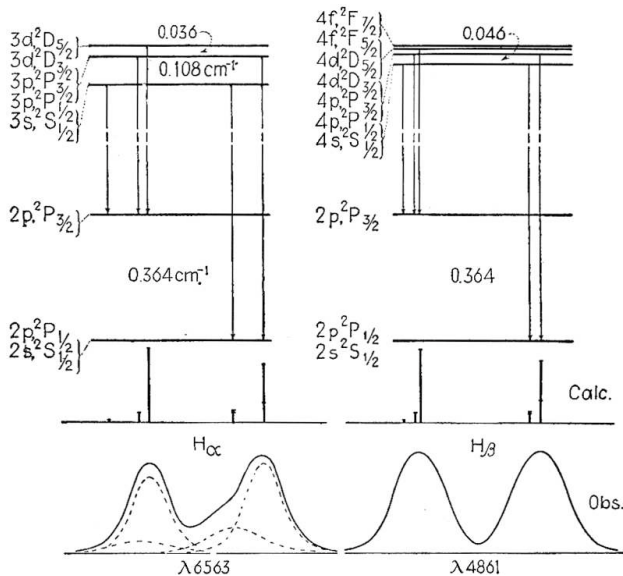


FIG. 11.4.—Triplet-triplet transitions showing selection rules and relative intensities.

(H. E. White, *Introduction to Atomic Spectra*)

$$I \propto \langle J_i || D || J_k \rangle = (-1)^{S+1+L_i+J_k} \sqrt{g_i g_k} \begin{Bmatrix} L_i & J_i & S \\ J_k & L_k & 1 \end{Bmatrix} \langle L_i || D || L_k \rangle$$



(H. E. White, *Introduction to Atomic Spectra*)

Líneas de Balmer

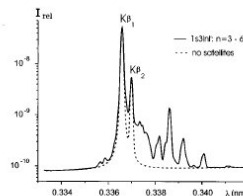
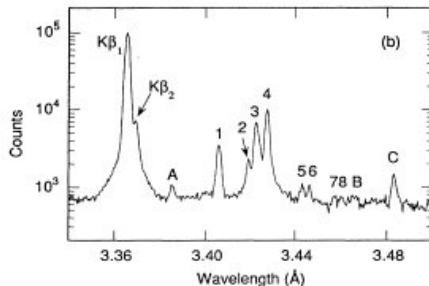


FIG. 3. Line overlapping of dielectronic Rydberg satellites $1s3lnl'$ with the $K\beta$ lines, $n_e = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $kT_e = 500 \text{ eV}$.

Oscillator Strengths

- ▶ Se define un elemento adimensional

$$f_{ka} = \frac{2m\omega_{ka}}{3\hbar} |\mathbf{r}_{ka}|^2$$

- ▶ $\omega_{ka} = (E_k - E_a)/\hbar$ puede ser positiva (absorción) o negativa (emisión).

- ▶ Se puede probar la regla de Thomas, Reiche y Kuhn

$$\sum_k f_{ka} = 1$$

- ▶ $\sum_{n'} f(n, l \rightarrow n', l-1) = -\frac{l(2l-1)}{3(2l+1)}$
 $\sum_{n'} f(n, l \rightarrow n', l+1) = \frac{(l+1)(2l+3)}{3(2l+1)}$

- ▶ Con esta definición:

$$A_{ji} = \frac{8\pi^2 e^2}{mc} \frac{1}{\lambda^2} |f_{ji}|$$

Oscillator Strengths

OSCILLATOR STRENGTH SUM RULES

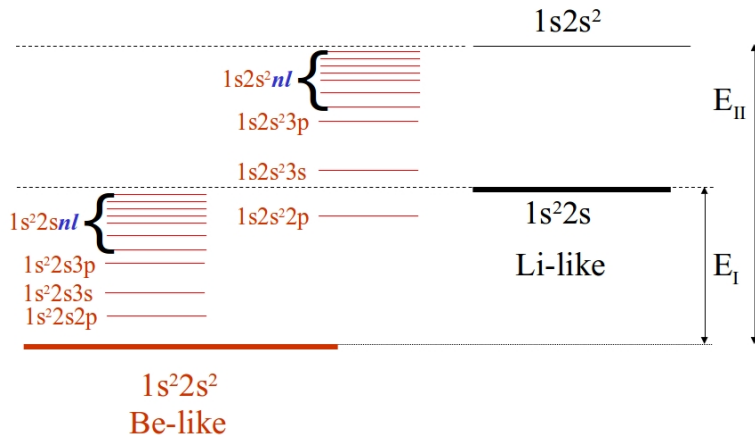
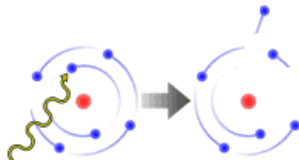
14-14

TABLE 14-4. NON-RELATIVISTIC ARRAY (=MULTIPLY) OSCILLATOR STRENGTHS FOR HYDROGENIC ATOMS^a

	Initial	1s	2s	2p		3s	3p		3d	
	Final	np	np	ns	nd	np	ns	nd	np	nf
n=1		---	---	-0.139	---	---	-0.026	---	---	---
2		0.4162	---	---	---	-0.041	-0.145	---	-0.417	---
3		0.0791	0.4349	0.014	0.696	---	---	---	---	---
4		0.0290	0.1028	0.0031	0.122	0.484	0.032	0.619	0.011	1.016
5		0.0139	0.0419	0.0012	0.044	0.121	0.007	0.139	0.0022	0.156
6		0.0078	0.0216	0.0006	0.022	0.052	0.003	0.056	0.0009	0.053
7		0.0048	0.0127	0.0003	0.012	0.027	0.002	0.028	0.0004	0.025
8		0.0032	0.0081	0.0002	0.008	0.016	0.001	0.017	0.0002	0.015
n=9 to ∞		0.0109	0.0268	0.0007	0.023	0.048	0.004	0.045	0.0007	0.037
Sum {	Discrete	0.5650	0.6489	-0.119	0.928	0.707	-0.121	0.904	-0.402	1.302
	Continuum	0.4350	0.3511	0.008	0.183	0.293	0.010	0.207	0.002	0.098
Total		1.000	1.000	-0.111	1.111	1.000	-0.111	1.111	-0.400	1.400

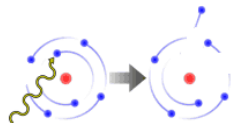
^aValues for larger l may be found in H. A. Bethe and E. E. Salpeter, ref. 4, Sec. 63. For $Z > 20$, oscillator strengths depart increasingly strongly from the above values.

Fotoionización



Fotoionización

- ▶ Vamos a considerar la transición de un electrón en el estado fundamental del hidrógeno a un estado del continuo
 $\varphi_f \propto \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$
- ▶ Con ciertas aproximaciones, la sección eficaz de fotoionización es
$$\sigma_{1k} = \frac{256\pi}{3} \alpha Z^{-2} \left(\frac{|\chi_H|}{\hbar\omega} \right)^{7/2} a_0^2$$
- ▶ Notar que decrece como $(\hbar\omega)^{-7/2}$ y crece como Z^5 .

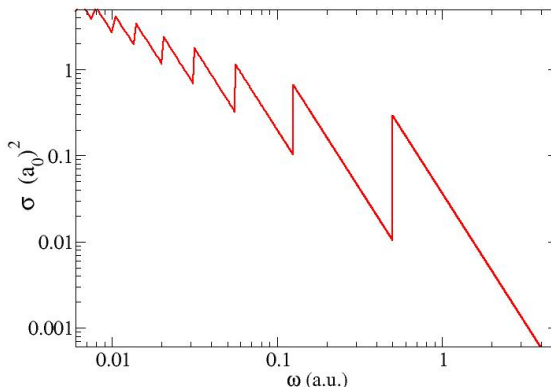


Fotoionización

- Para el caso general, la ionización desde el nivel n es

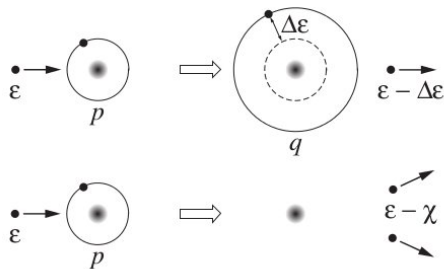
$$\sigma_{nk} = \frac{64\pi}{3\sqrt{3}} \alpha g_{nk} \left(\frac{1}{Z}\right)^2 n \left(\frac{\omega_n}{\omega}\right)^3 a_0^2$$

- Notar que decrece como $(\omega)^{-3}$



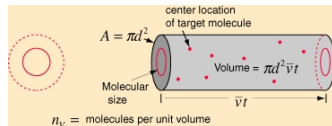
Procesos Colisionales

- ▶ Excitación por impacto de electrones
- ▶ De-excitación por impacto de electrones
- ▶ Ionización por impacto de electrones
- ▶ Recombinación por impacto de electrones



Sección Eficaz

- ▶ Supongamos que un proyectil incide sobre un área A .
- ▶ Hay n_b partículas (blanco) por m^3 .
- ▶ La velocidad del proyectil (en $\hat{x}$) es v y la unidad de tiempo t .
- ▶ El número de partículas que pueden colisionar con el proyectil es $n_b V = n_b (A \times x) = n_b A v t$.
- ▶ El número de colisiones por unidad de tiempo es $n_b A v$.



Sección Eficaz

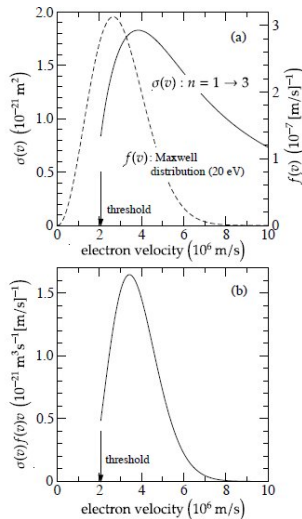
- ▶ Se define como **sección eficaz (σ)** al área efectiva que produce un proceso determinado por unidad de tiempo.
- ▶ O sea, el número de procesos que se producen por unidad de tiempo (debido a un proyectil) es $n_b \sigma v$.
- ▶ Supongamos que la densidad de los proyectiles es de n_p
- ▶ El número total de procesos que se producen por unidad de volumen, por unidad de tiempo es

$$\int n_b \sigma v dn_p(v) = n_b n_p \int \sigma v \frac{dn_p(v)}{n_p} = n_b n_p \int \sigma v f(v) dv =$$

$$= n_b n_p \langle \sigma v \rangle$$
- ▶ A la cantidad $\langle \sigma v \rangle \equiv \int \sigma v f(v) dv$ se la llama **tasa** ($[m^3 s^{-1}]$).

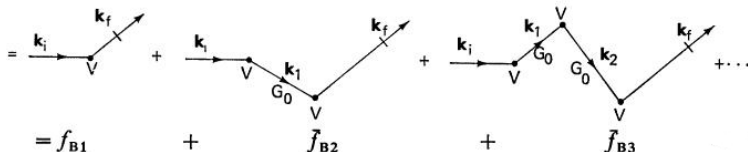
Tasa y Sección Eficaz

- $\sigma v f(v) dv$ es función de la velocidad
- Pero $\langle \sigma v \rangle \equiv \int \sigma v f(v) dv$ es función de la Temperatura unicamente !!



Aproximación de Born

Esta aproximación permite calcular secciones eficaces de excitación en forma simple.



$$\psi_0(\mathbf{r}) = \Phi_{k_i}(\mathbf{r}) = (2\pi)^{-3/2} e^{i\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r}}$$

$$\psi_1(\mathbf{r}) = \Phi_{k_i}(\mathbf{r}) + \int G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') U(\mathbf{r}') \Phi_{k_i}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'$$

$$\psi_2(\mathbf{r}) = \Phi_{k_i}(\mathbf{r}) + \int G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') U(\mathbf{r}') \psi_1(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'$$

(1)

Excitación

Para **neutrales**, la aproximación de Born para la sección eficaz de excitación por impacto de electrones resulta:

$$\sigma_{ij}(u) = 4\pi a_0^2 \frac{I_H}{\Delta E_{ij}} \frac{1}{u} \log 4u |s_{ij}|^2$$

donde $|s_{ij}|^2 = \frac{1}{3a_0^2} |r_{ij}|^2$ y $u = \frac{E}{E_{ij}}$.

En función del *absorption oscillator strenght* f_{ij} se expresa (práctica):

$$\sigma_{ij}(u) = 4\pi a_0^2 f_{ij} \left(\frac{I_H}{\Delta E_{ij}} \right)^2 \frac{1}{u} \log 4u$$

Excitación

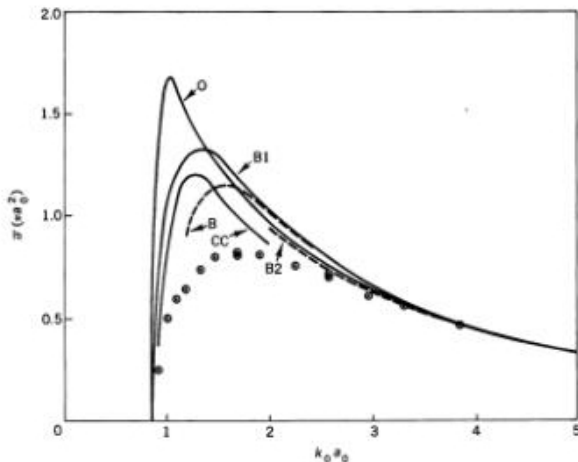


FIG. 11. Total cross section for the $1s \rightarrow 2p$ excitation of hydrogen atoms by electron impact: B1, first Born approximation; B2, second Born approximation (to order U^2); O, Oppenheimer approximation; B, Bethe approximation; CC, close coupling approximation with $1s-2s-2p$ basis set (Section 16); circles, experimental results normalized to the Born approximation at 200 eV ($k_0 a_0 = 3.84$).

Excitación

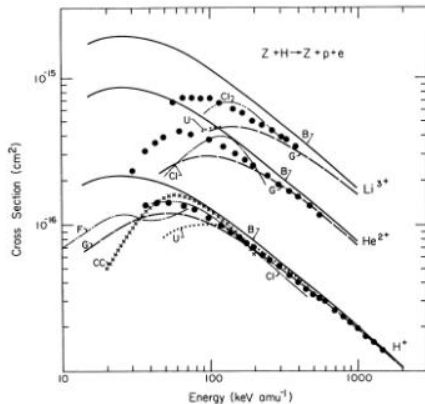
Experimentalmente se encuentra que en el umbral ("threshold") la sección eficaz se anula $\sigma(1) = 0$.

Discrepancias Fundamentales

- ▶ $\sigma(1)^{Born} \neq 0$.
- ▶ $\sigma_{max}^{exp} < \sigma_{max}^{Born}$
- ▶ $u_{max}^{exp} > u_{max}^{Born}$

Schwob and Drawin:

$$\sigma_{ij}(u) = 4\pi a_0^2 R f_{ij} \left(\frac{I_H}{\Delta E_{ij}} \right)^2 \frac{u-1}{u^2} \log \beta u$$

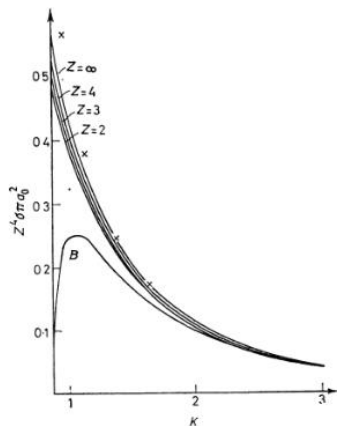


Excitación

Para **iones** (en estos casos $\sigma(1) \neq 0$), se puede utilizar la aproximación de Van Regemorter:

$$\sigma_{ij}(u) = 4\pi a_0^2 2\pi\sqrt{3} f_{ij} \left(\frac{I_H}{\Delta E_{ij}} \right)^2$$

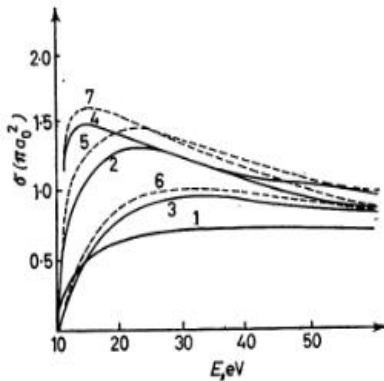
El *factor de Gaunt* $g(u)$ es aproximadamente 0.2 cerca del umbral, y se ajusta con el valor de neutrales para altas energías.



Transiciones Prohibidas

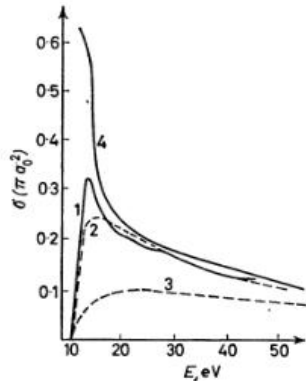
Transición Permitida:

$$1s - 2p$$



Transición "Prohibida":

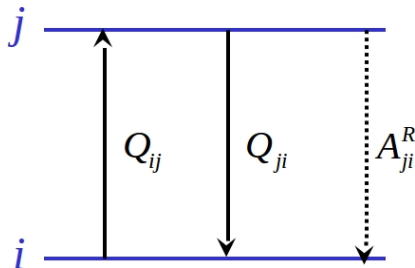
$$1s - 2s$$



De-Excitación

En general, los coeficientes de de-excitación colisional son poco conocidos. Pero están profundamente relacionados con los de excitación.

- Consideremos un plasma LTE. La microreversibilidad dice que $n_e n_j Q_{ji}(T_e) = n_e n_i Q_{ij}(T_e)$
- En LTE se cumple Boltzmann $\Rightarrow$



$$Q_{ji} = \frac{n_i}{n_j} Q_{ij}(T_e) = \frac{g_i}{g_j} e^{\frac{\Delta E_{ij}}{kT_e}} Q_{ij}(T_e)$$

De-Excitación

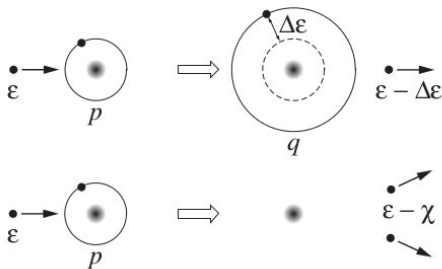
Si bien derivamos la expresión anterior asumiendo un plasma en LTE, existe una relación entre las secciones eficaces. Esta relación es una **propiedad atómica**.

- ▶ Consideremos un plasma LTE. La microreversibilidad dice que
$$n_e n_j \sigma_{ji}(v_j) v_j f(v_j) dv_j = n_e n_i \sigma_{ij}(v_i) v_i f(v_i) dv_i$$
- ▶ $\frac{1}{2} m_e v_i^2 = \Delta E_{ij} + \frac{1}{2} m_e v_j^2$
- ▶ $v_i dv_i = v_j dv_j$ (diferenciando).
- ▶ $\frac{\sigma_{ji}(v_j)}{\sigma_{ij}(v_i)} = \frac{n_i f(v_i)}{n_j f(v_j)}$
- ▶ Se cumplen Maxwell y Boltzmann $\Rightarrow$

$$\sigma_{ji}(E_i) = \frac{g_i}{g_j} \frac{E_i}{E_j} \sigma_{ij}(E_i)$$

Procesos Colisionales

- ▶ Excitación por impacto de electrones
- ▶ De-excitación por impacto de electrones
- ▶ Ionización por impacto de electrones
- ▶ Recombinación por impacto de electrones



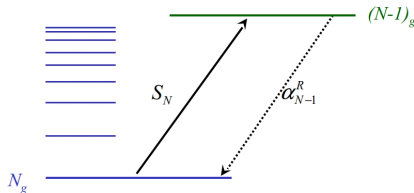
Ionización

En el cálculo de este proceso también se puede utilizar la aproximación de Born:

$$\sigma_{ij}(u) = 4\pi a_0^2 \frac{I_H}{\Delta E_{ij}} \frac{1}{u} \log 4u |s_{ij}|^2$$

donde $|s_{ij}|^2 = \frac{1}{3a_0^2} |r_{ij}|^2$ y

$$u = \frac{E}{E_I}.$$

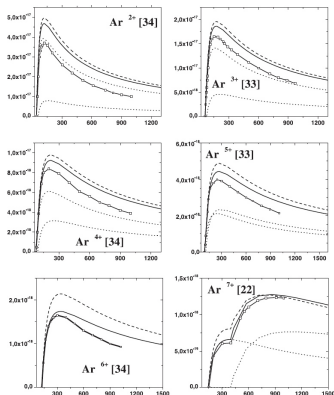


Ionización

Una fórmula semi-empírica muy popular es la fórmula de **Lotz**, de ionización de un ión de carga r en el estado fundamental:

$$S_r = 3.03 \times 10^6 \sum_s \frac{\zeta_s}{kT_e^{3/2}} \frac{E_1(E_{r,s}/kT_e)}{(E_{r,s}/kT_e)}$$

donde S_r está en cm^3s^{-1} , kT_e es la temperatura electrónica en eV, ζ_s es el número de ocupación de la subcapa s , y $E_{r,s}$ es la energía de ligadura de los electrones en esta subcapa (en eV). E_1 es la función exponencial-integral.



Recombinación por tres-cuerpos

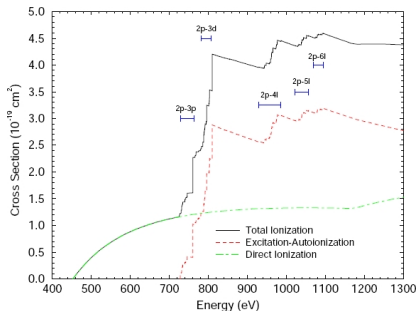
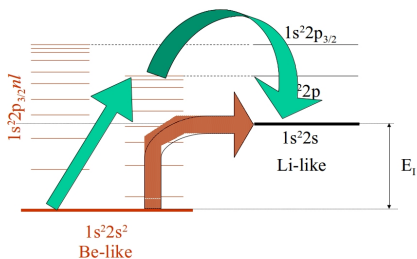
El proceso inverso al de ionización consiste inicialmente en dos electrones libres y un ión de carga $r + 1$ (en el estado fundamental f), y la captura de uno de ellos, formando un ión de carga r , en un estado j , (más un electrón libre) en el estado final.

- ▶ Consideremos un plasma LTE. La microreversibilidad dice que

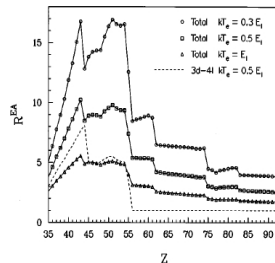
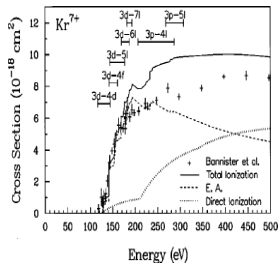
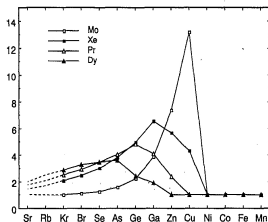
$$n_e^2 n_{r+1,f} \alpha_{r+1,f \rightarrow r,j}^R(T_e) = n_e n_{r,j} S_{r,j \rightarrow r+1,f}(T_e)$$
- ▶ $\alpha_{r+1,f \rightarrow r,j}^R(T_e) = \frac{n_{r,j}}{n_e n_{r+1,f}} S_{r,j \rightarrow r+1,f}(T_e)$
- ▶ En LTE se cumple Saha $\Rightarrow$

$$\alpha_{r+1,f \rightarrow r,j}^R(T_e) = \frac{g_{r,j}}{2g_{r+1,f}} \frac{h^3}{(2\pi m_e k T_e)^{3/2}} e^{\Delta E_{rj,f}/kT_e} S_{r,j \rightarrow r+1,f}(T_e)$$

Excitación–Autoionización



Excitación–Autoionización



Recombinación Radiativa

Es el proceso inverso de Fotoionización.

- ▶ Número de recombinaciones del ión $r + 1$ en el nivel f , por cm^3 , debido a electrones con velocidades $(v, v + dv)$:

$$N_{k \rightarrow i} = n_{r+1,f} n_e \sigma_{ki}(v) f(v) dv$$

- ▶ Número de fotoionizaciones producidas del ión r en el nivel i , debido a un campo de intensidad J_ν

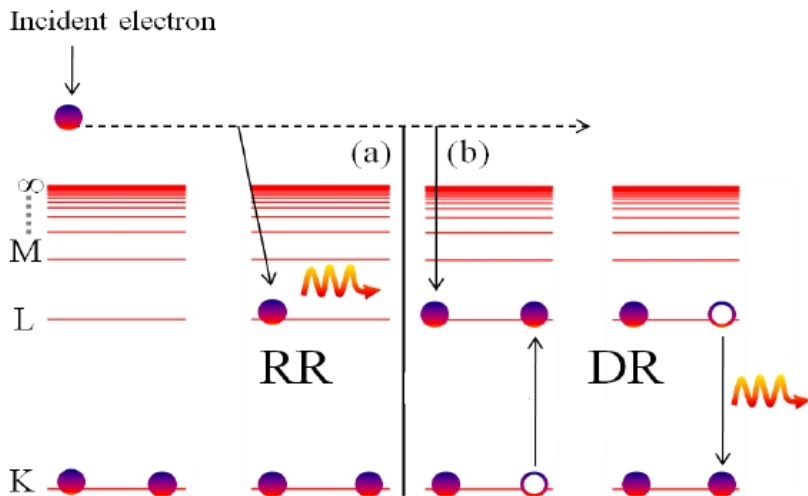
$$N_{i \rightarrow k} = \frac{4\pi}{h\nu} n_{r,i} \sigma_{ik}(\nu) J_\nu(\nu) d\nu$$

- ▶ Para incluir el efecto de emisión estimulada J_ν es reemplazada por $J_\nu(1 - e^{-\frac{h\nu}{kT_e}})$

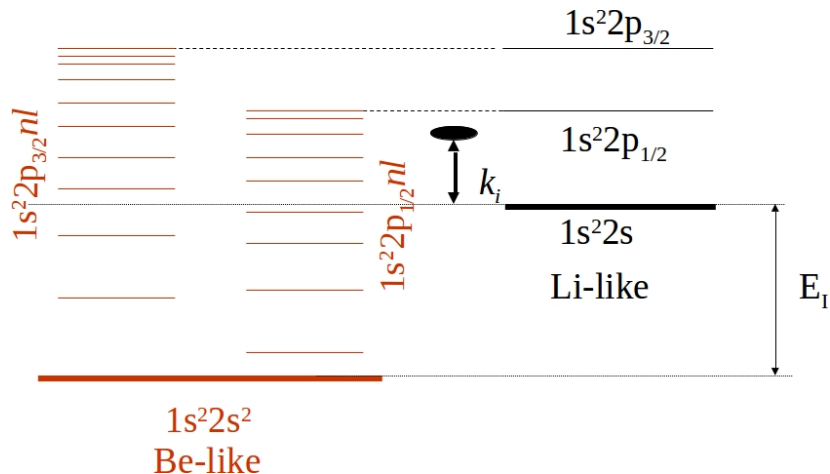
- ▶ Usando Planck, Maxwell y Saha $\Rightarrow$

$$\sigma_{ki} = \frac{g_{r,i}}{g_{r+1,f}} \frac{h^2}{m_e^2 c^2} \frac{\nu}{v^2}$$

Recombinación Dielectrónica



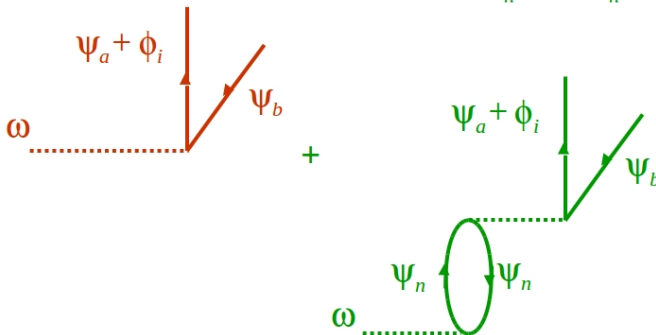
Recombinación Dielectrónica



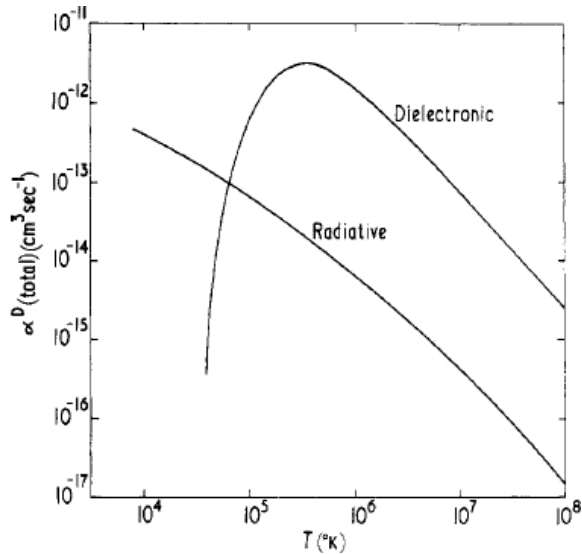
Recombinación Dielectrónica

Photoionization:

$$M_{ba} = \langle \psi_b | \mathbf{D} | \psi_a \phi_i \rangle + \frac{\langle \psi_b | \mathbf{V} | \psi_n \rangle \langle \psi_n | \mathbf{D} | \psi_a \phi_i \rangle}{\Delta_n + i \Gamma_n / 2}$$



Recombinación Dielectrónica



Recombinación Dielectrónica



Recombinación Dielectrónica

