

L'ère des atomes



1895 - 1928

Trois modèles d'atomes :
Thomson, Rutherford, Bohr

En guise d'introduction...

« On a imaginé deux hypothèses pour expliquer les propriétés des rayons cathodiques.

Les uns, avec *Goldstein, Hertz ou Lenard*, pensent que ce phénomène est dû, *comme la lumière*, à des *vibrations de l'éther*, ou même que c'est une lumière, à courte longueur d'onde. On conçoit bien alors que ces rayons aient une trajectoire rectiligne, excitent la phosphorescence, et impressionnent les plaques photographiques.

D'autres, avec *Crookes ou J.J. Thomson*, pensent que ces rayons sont formés par *de la matière* chargée négativement et cheminant à grande vitesse. Et l'on conçoit alors très bien leurs propriétés mécaniques, ainsi que la façon dont ils s'incurvent dans un champ magnétique.

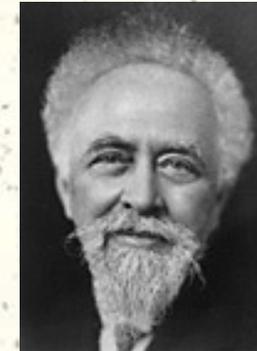
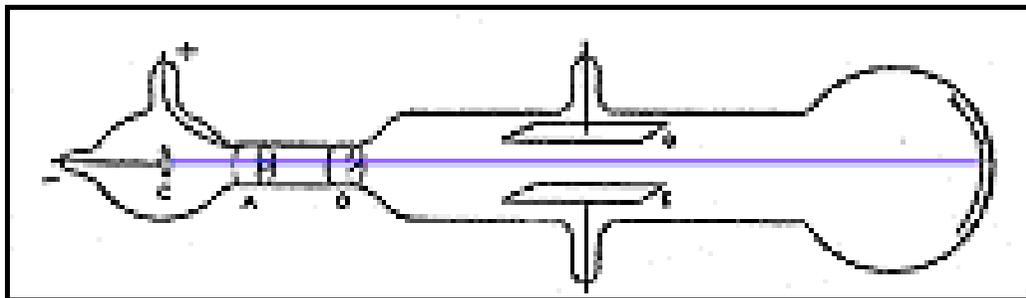
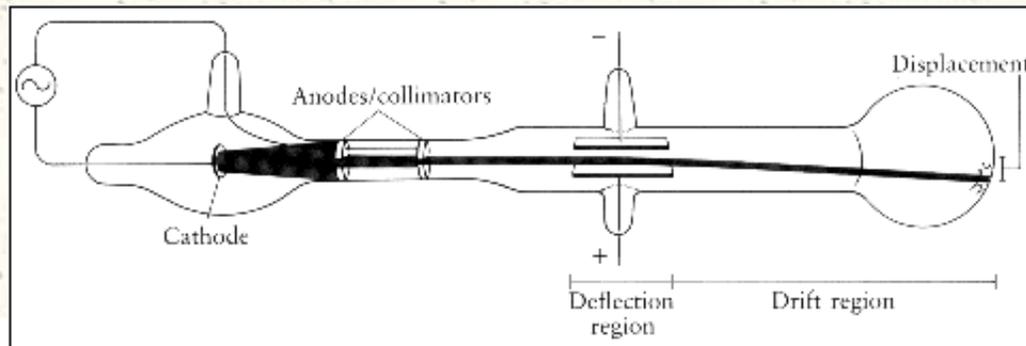
Cette dernière hypothèse m'a suggéré quelque expérience que je vais résumer sans m'inquiéter, pour le moment, de rechercher si elle rend compte de tous les faits jusqu'à présent connus, et si elle peut seule en rendre compte.

Ses partisans admettent que les rayons cathodiques sont chargés négativement ; à ma connaissance, on n'a pas constaté cette électrisation ; j'ai d'abord tenté de vérifier si elle existe, ou non. »

Jean-Baptiste Perrin, dans un article de 1895

L'objet à la mode en 1895 (déjà)

Le tube cathodique !



Jean-Baptiste Perrin montre que les rayons cathodiques sont chargés négativement (1895)

Découverte des rayons X



Wilhelm Conrad Röntgen

Le 8 novembre 1895, en manipulant un tube de Crookes (cathodique), il observe par hasard la fluorescence d'un écran situé non loin...

Rayons inconnus (X en mathématique)

- Plus pénétrants que les rayons cathodiques
- Absorbés par la matière (\propto masse atomique)
- Impressionnent les plaques photographiques.
- Pas de propriétés optiques (miroir, prisme)



M^{me} Röntgen

Découverte des rayons X

Archétype d'expérience de physique des particules :

Une « source » :

- Ici, les rayons cathodiques créent les rayons X sur les parois du tube
- Après : cosmiques, accélérateur...

Un détecteur :

- Ici, l'œil nu sur écran de cyanure de platine
- Après : chambre à bulles, électronique...

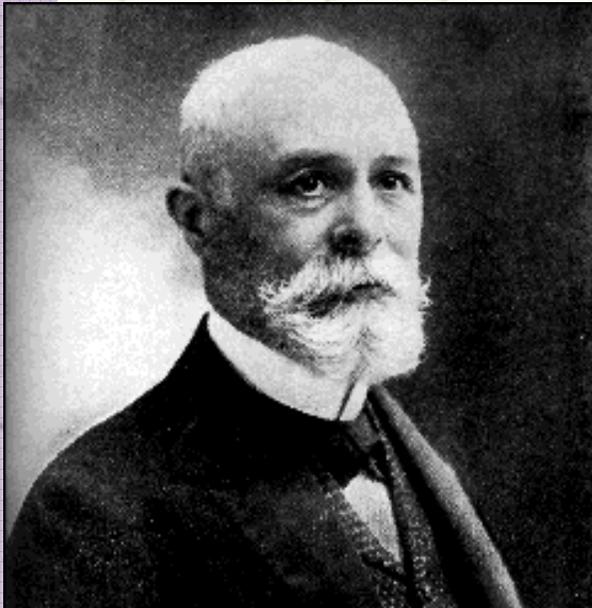
Améliorations constantes offrent de nouvelles découvertes (et des Nobel)

Et un prix Nobel

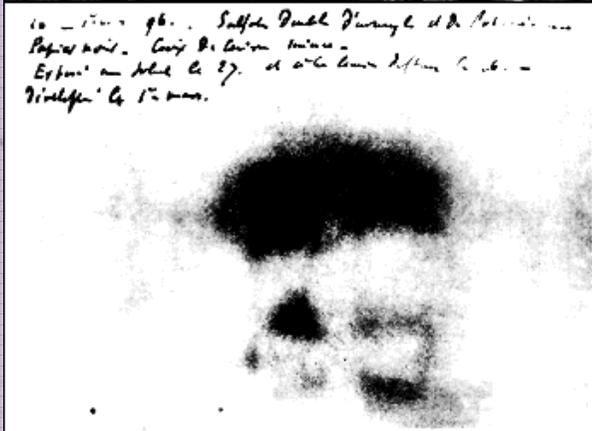
- Ici, le premier
- Après, au moins 73 Nobel autour des particules (théorie + expérience / nucléaire + particules)



Découverte de la radioactivité



10 - 11 - 12 - 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - 24 - 25 - 26 - 27 - 28 - 29 - 30 - 31 - 32 - 33 - 34 - 35 - 36 - 37 - 38 - 39 - 40 - 41 - 42 - 43 - 44 - 45 - 46 - 47 - 48 - 49 - 50 - 51 - 52 - 53 - 54 - 55 - 56 - 57 - 58 - 59 - 60 - 61 - 62 - 63 - 64 - 65 - 66 - 67 - 68 - 69 - 70 - 71 - 72 - 73 - 74 - 75 - 76 - 77 - 78 - 79 - 80 - 81 - 82 - 83 - 84 - 85 - 86 - 87 - 88 - 89 - 90 - 91 - 92 - 93 - 94 - 95 - 96 - 97 - 98 - 99 - 100 - 101 - 102 - 103 - 104 - 105 - 106 - 107 - 108 - 109 - 110 - 111 - 112 - 113 - 114 - 115 - 116 - 117 - 118 - 119 - 120 - 121 - 122 - 123 - 124 - 125 - 126 - 127 - 128 - 129 - 130 - 131 - 132 - 133 - 134 - 135 - 136 - 137 - 138 - 139 - 140 - 141 - 142 - 143 - 144 - 145 - 146 - 147 - 148 - 149 - 150 - 151 - 152 - 153 - 154 - 155 - 156 - 157 - 158 - 159 - 160 - 161 - 162 - 163 - 164 - 165 - 166 - 167 - 168 - 169 - 170 - 171 - 172 - 173 - 174 - 175 - 176 - 177 - 178 - 179 - 180 - 181 - 182 - 183 - 184 - 185 - 186 - 187 - 188 - 189 - 190 - 191 - 192 - 193 - 194 - 195 - 196 - 197 - 198 - 199 - 200 - 201 - 202 - 203 - 204 - 205 - 206 - 207 - 208 - 209 - 210 - 211 - 212 - 213 - 214 - 215 - 216 - 217 - 218 - 219 - 220 - 221 - 222 - 223 - 224 - 225 - 226 - 227 - 228 - 229 - 230 - 231 - 232 - 233 - 234 - 235 - 236 - 237 - 238 - 239 - 240 - 241 - 242 - 243 - 244 - 245 - 246 - 247 - 248 - 249 - 250 - 251 - 252 - 253 - 254 - 255 - 256 - 257 - 258 - 259 - 260 - 261 - 262 - 263 - 264 - 265 - 266 - 267 - 268 - 269 - 270 - 271 - 272 - 273 - 274 - 275 - 276 - 277 - 278 - 279 - 280 - 281 - 282 - 283 - 284 - 285 - 286 - 287 - 288 - 289 - 290 - 291 - 292 - 293 - 294 - 295 - 296 - 297 - 298 - 299 - 300 - 301 - 302 - 303 - 304 - 305 - 306 - 307 - 308 - 309 - 310 - 311 - 312 - 313 - 314 - 315 - 316 - 317 - 318 - 319 - 320 - 321 - 322 - 323 - 324 - 325 - 326 - 327 - 328 - 329 - 330 - 331 - 332 - 333 - 334 - 335 - 336 - 337 - 338 - 339 - 340 - 341 - 342 - 343 - 344 - 345 - 346 - 347 - 348 - 349 - 350 - 351 - 352 - 353 - 354 - 355 - 356 - 357 - 358 - 359 - 360 - 361 - 362 - 363 - 364 - 365 - 366 - 367 - 368 - 369 - 370 - 371 - 372 - 373 - 374 - 375 - 376 - 377 - 378 - 379 - 380 - 381 - 382 - 383 - 384 - 385 - 386 - 387 - 388 - 389 - 390 - 391 - 392 - 393 - 394 - 395 - 396 - 397 - 398 - 399 - 400 - 401 - 402 - 403 - 404 - 405 - 406 - 407 - 408 - 409 - 410 - 411 - 412 - 413 - 414 - 415 - 416 - 417 - 418 - 419 - 420 - 421 - 422 - 423 - 424 - 425 - 426 - 427 - 428 - 429 - 430 - 431 - 432 - 433 - 434 - 435 - 436 - 437 - 438 - 439 - 440 - 441 - 442 - 443 - 444 - 445 - 446 - 447 - 448 - 449 - 450 - 451 - 452 - 453 - 454 - 455 - 456 - 457 - 458 - 459 - 460 - 461 - 462 - 463 - 464 - 465 - 466 - 467 - 468 - 469 - 470 - 471 - 472 - 473 - 474 - 475 - 476 - 477 - 478 - 479 - 480 - 481 - 482 - 483 - 484 - 485 - 486 - 487 - 488 - 489 - 490 - 491 - 492 - 493 - 494 - 495 - 496 - 497 - 498 - 499 - 500 - 501 - 502 - 503 - 504 - 505 - 506 - 507 - 508 - 509 - 510 - 511 - 512 - 513 - 514 - 515 - 516 - 517 - 518 - 519 - 520 - 521 - 522 - 523 - 524 - 525 - 526 - 527 - 528 - 529 - 530 - 531 - 532 - 533 - 534 - 535 - 536 - 537 - 538 - 539 - 540 - 541 - 542 - 543 - 544 - 545 - 546 - 547 - 548 - 549 - 550 - 551 - 552 - 553 - 554 - 555 - 556 - 557 - 558 - 559 - 560 - 561 - 562 - 563 - 564 - 565 - 566 - 567 - 568 - 569 - 570 - 571 - 572 - 573 - 574 - 575 - 576 - 577 - 578 - 579 - 580 - 581 - 582 - 583 - 584 - 585 - 586 - 587 - 588 - 589 - 590 - 591 - 592 - 593 - 594 - 595 - 596 - 597 - 598 - 599 - 600 - 601 - 602 - 603 - 604 - 605 - 606 - 607 - 608 - 609 - 610 - 611 - 612 - 613 - 614 - 615 - 616 - 617 - 618 - 619 - 620 - 621 - 622 - 623 - 624 - 625 - 626 - 627 - 628 - 629 - 630 - 631 - 632 - 633 - 634 - 635 - 636 - 637 - 638 - 639 - 640 - 641 - 642 - 643 - 644 - 645 - 646 - 647 - 648 - 649 - 650 - 651 - 652 - 653 - 654 - 655 - 656 - 657 - 658 - 659 - 660 - 661 - 662 - 663 - 664 - 665 - 666 - 667 - 668 - 669 - 670 - 671 - 672 - 673 - 674 - 675 - 676 - 677 - 678 - 679 - 680 - 681 - 682 - 683 - 684 - 685 - 686 - 687 - 688 - 689 - 690 - 691 - 692 - 693 - 694 - 695 - 696 - 697 - 698 - 699 - 700 - 701 - 702 - 703 - 704 - 705 - 706 - 707 - 708 - 709 - 710 - 711 - 712 - 713 - 714 - 715 - 716 - 717 - 718 - 719 - 720 - 721 - 722 - 723 - 724 - 725 - 726 - 727 - 728 - 729 - 730 - 731 - 732 - 733 - 734 - 735 - 736 - 737 - 738 - 739 - 740 - 741 - 742 - 743 - 744 - 745 - 746 - 747 - 748 - 749 - 750 - 751 - 752 - 753 - 754 - 755 - 756 - 757 - 758 - 759 - 760 - 761 - 762 - 763 - 764 - 765 - 766 - 767 - 768 - 769 - 770 - 771 - 772 - 773 - 774 - 775 - 776 - 777 - 778 - 779 - 780 - 781 - 782 - 783 - 784 - 785 - 786 - 787 - 788 - 789 - 790 - 791 - 792 - 793 - 794 - 795 - 796 - 797 - 798 - 799 - 800 - 801 - 802 - 803 - 804 - 805 - 806 - 807 - 808 - 809 - 810 - 811 - 812 - 813 - 814 - 815 - 816 - 817 - 818 - 819 - 820 - 821 - 822 - 823 - 824 - 825 - 826 - 827 - 828 - 829 - 830 - 831 - 832 - 833 - 834 - 835 - 836 - 837 - 838 - 839 - 840 - 841 - 842 - 843 - 844 - 845 - 846 - 847 - 848 - 849 - 850 - 851 - 852 - 853 - 854 - 855 - 856 - 857 - 858 - 859 - 860 - 861 - 862 - 863 - 864 - 865 - 866 - 867 - 868 - 869 - 870 - 871 - 872 - 873 - 874 - 875 - 876 - 877 - 878 - 879 - 880 - 881 - 882 - 883 - 884 - 885 - 886 - 887 - 888 - 889 - 890 - 891 - 892 - 893 - 894 - 895 - 896 - 897 - 898 - 899 - 900 - 901 - 902 - 903 - 904 - 905 - 906 - 907 - 908 - 909 - 910 - 911 - 912 - 913 - 914 - 915 - 916 - 917 - 918 - 919 - 920 - 921 - 922 - 923 - 924 - 925 - 926 - 927 - 928 - 929 - 930 - 931 - 932 - 933 - 934 - 935 - 936 - 937 - 938 - 939 - 940 - 941 - 942 - 943 - 944 - 945 - 946 - 947 - 948 - 949 - 950 - 951 - 952 - 953 - 954 - 955 - 956 - 957 - 958 - 959 - 960 - 961 - 962 - 963 - 964 - 965 - 966 - 967 - 968 - 969 - 970 - 971 - 972 - 973 - 974 - 975 - 976 - 977 - 978 - 979 - 980 - 981 - 982 - 983 - 984 - 985 - 986 - 987 - 988 - 989 - 990 - 991 - 992 - 993 - 994 - 995 - 996 - 997 - 998 - 999 - 1000



- # **Henri Becquerel** étudie la phosphorescence et la compare aux rayons X
- # **Dimanche 1^{er} mars 1896**
- # Il trouve, par hasard, que l'uranium émet des rayons, même dans l'obscurité
- # **Source** : uranium
- # **Détecteur** : plaque photo

Anecdote

- # Il pleut...
- # Becquerel range ses sels d'uranium dans un tiroir, sur des plaques photos.
- # Rigueur scientifique ou intuition géniale, il en développe une avant de reprendre ses expériences...

MÉTÉOROLOGIE NATIONALE PARIS (PARC DE SAINT-MAUR)

NEBULOSITÉ, en 1/10

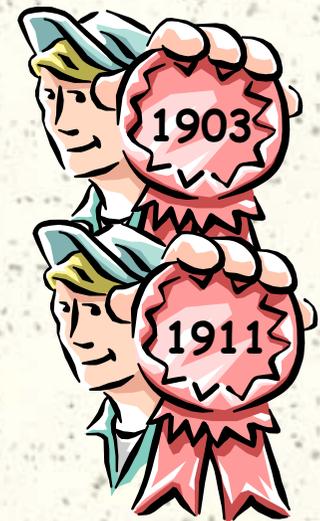
DATES HEURES	FÉVRIER 1896							MARS 1896				
	SUN 23	MON 24	TUES 25	WED 26	THURS 27	FRI 28	SAT 29	SUN 1	MON 2	TUES 3	3	4
5h.	0	0	0	0	10	10	10	10	0	10	10	1
6.	0	0	0	0	10	10	10	10	0	10	10	10
7.	0	0	0	0	10	10	10	10	0	10	5	10
8.	0	0	4	0	10	10	10	10	0	10	1	9
9.	0	0	2	0	10	10	10	10	4	10	9	10
10.	0	0	5	1	10	10	10	10	10	10	10	10
11.	0	0	3	7	10	10	10	10	6	10	10	10
12.	0	0	2	8	10	10	10	10	8	10	8	9
13.	0	0	4	8	5	10	10	10	6	10	10	9
14.	0	0	7	7	4	10	10	10	7	10	7	6
15.	0	0	8	9	0	10	10	10	8	10	6	8
16.	0	0	7	9	0	10	10	10	10	10	10	7
17.	0	0	0	10	0	10	10	10	10	10	10	3
18.	0	0	0	10	0	10	10	10	10	6	10	2
19.	0	0	0	9	0	10	10	10	7	10	10	7

Études de la radioactivité



Pierre et Marie Curie continuent l'étude

- Toute forme d'uranium (processus non chimique)
- Nobel de physique avec Becquerel
- Thorium, polonium, radium. (Nobel de chimie à Marie)



- # 1899 Rutherford : deux radiations (α et β)
- # 1900 Becquerel, Villard : radiation γ
- # 1903 Rutherford : charge α^{++} (Nobel chimie)



Expérience de Thomson



- # J.J. Thomson
- # Le 30 avril 1897
- # Source : rayons cathodiques
- # Détecteur : œil nu !

- # Mesures des déviations magnétique et électrique des rayons cathodiques -> rapport charge/masse
- # Corpuscules de charge négative, de masse $\sim m_H/1800$

« ... nous avons de la matière dans un état nouveau au sein des rayons cathodiques, état dans lequel la subdivision de la matière est poussée beaucoup plus loin que dans les états gazeux ordinaires : un état dans lequel la matière de différentes sources telles que l'hydrogène, l'oxygène, etc. est de même nature, cette matière étant la substance dont sont faits les éléments chimiques ... »

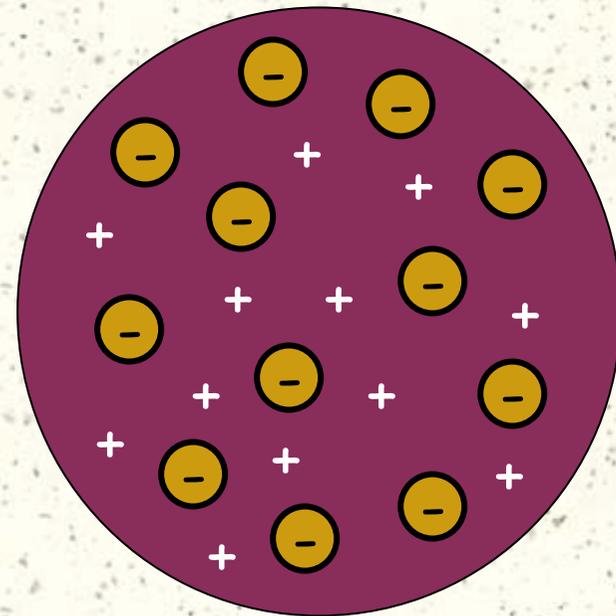
(J.J. Thomson (1897) Cathode Rays, Philosophical Magazine, 44, 295.)

L'électron et l'atome de Thomson

- # Thomson a découvert l'électron !
 - Particule élémentaire encore aujourd'hui

- # Modèle atomique du Plum-Pudding (~1904)

- Pâte positive
- Grains négatifs



Anecdote : que de Thomson...

William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907)

Sir Joseph John Thomson (1856-1940)

- Découvre l'électron en 1897
- Aspect corpusculaire
- Prix Nobel



Sir George Paget Thomson (1892-1975)

- (fils de Joseph John)
- 1927 : il met en évidence l'aspect ondulatoire des électrons
- Prix Nobel avec C.J. Davisson



Anecdote : que de Thomson...



William Thomson
aka Lord Kelvin

Thomson, père



Thomson, fils



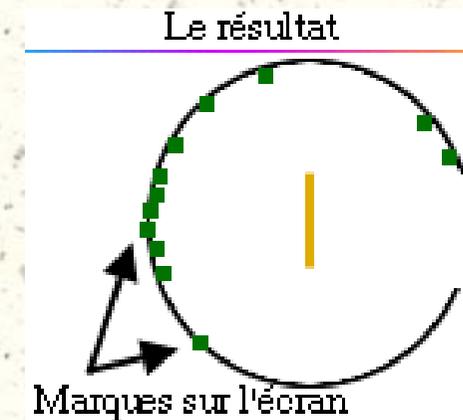
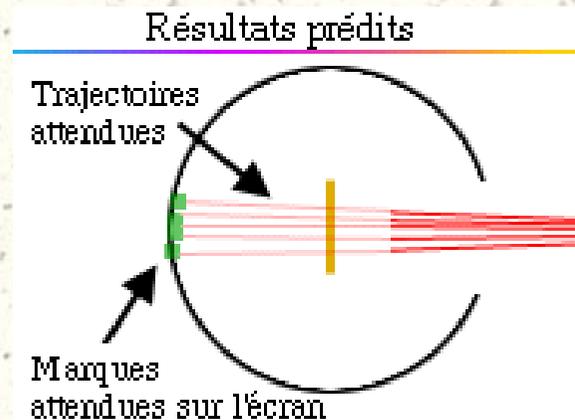
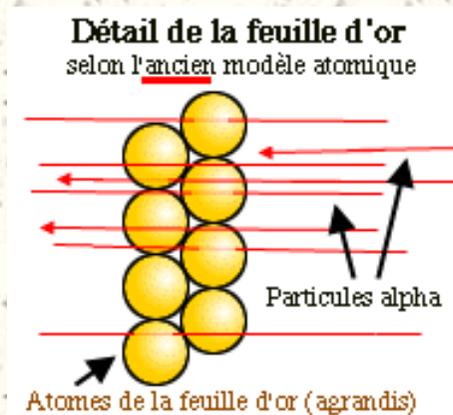
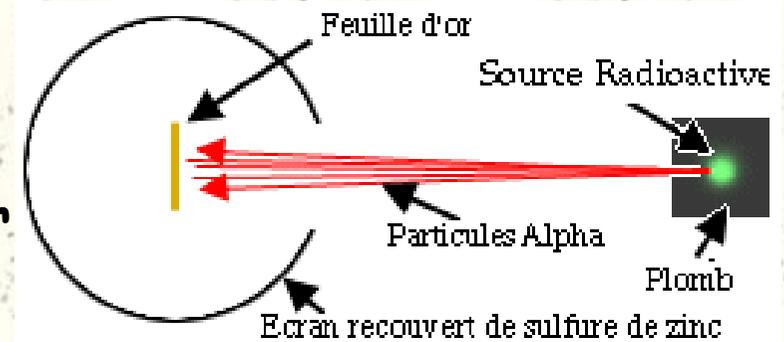
Expérience de Rutherford

1909 Geiger et Marsden regardent la diffusion de particules α sur feuille d'or

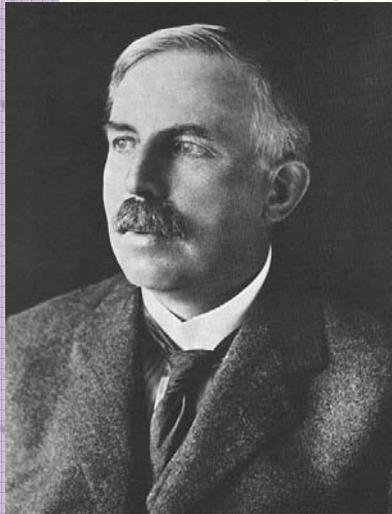
Source : radioactive α

Détecteur : écran de sulfure de zinc

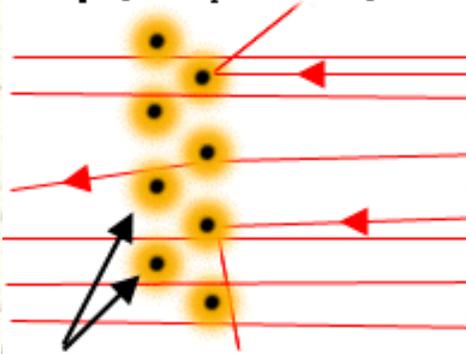
D'après le modèle de Thomson :



Expérience de Rutherford



La théorie du noyau positif explique la déflexion alpha



Atomes de la feuille d'or, agrandis

- # Interprétation de l'expérience

- # Article de **mai 1911**...

« ... nous supposons que, à des distances inférieures à 10^{-12} cm, la charge centrale et la charge des particules α peuvent être considérées comme étant concentrées en un point. »

- # **Concentration de charge**

 - (un moucheron sur un terrain de foot)

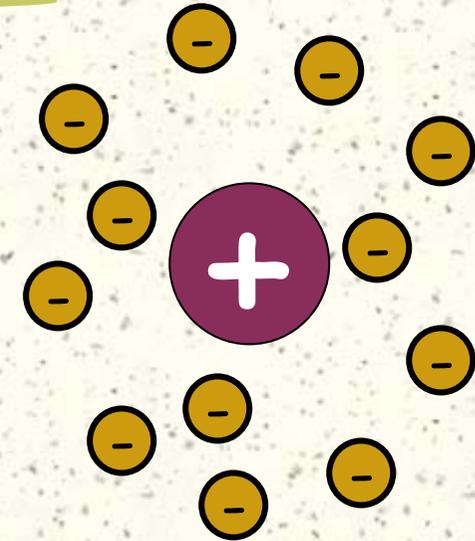
- # **C'est le noyau atomique !**

- # **Pas de Nobel (il en a déjà un)**

L'atome de Rutherford

Un atome planétaire ?

- Force centrifuge = électrique
- Mais les électrons peuvent rayonner de l'énergie et devraient s'effondrer sur le noyau...



1885 : Balmer remarque que le spectre de l'atome d'hydrogène : $\lambda \sim \frac{m^2}{m^2 - n^2}$

[En fait $\lambda \sim \frac{m^2 n^2}{m^2 - n^2}$ ($n=2$ pour Balmer)]

1914 $n=1$ (UV) Lyman / 1908 $n=3$ (IR) Paschen

Atome de Bohr



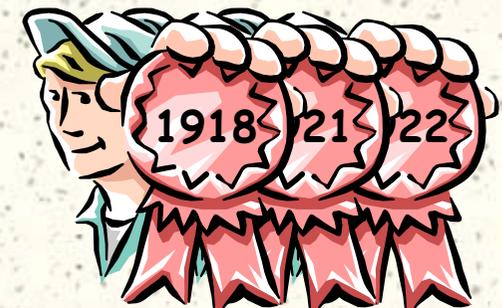
- # 1913 : Bohr donne des recettes pour construire un atome à la Rutherford, émettant les raies de Balmer & Co.
- États stationnaires d'énergie ($E_n = E_1/n^2$)
 - Les électrons ne rayonnent pas sauf :
 - Émission d'un rayonnement : $h\nu = E_m - E_n$

« La seule justification qui peut être offerte pour le moment à ces hypothèses est celle - très importante - qu'elles marchent »
James Jeans

3^{ème} détermination de la constante h !

1900 : Planck (corps noir)

1905 : Einstein (effet photoélectrique)



Autres mesures importantes

1913 : Millikan charge électronique

■ $q_e = 4,774 \pm 0,009 \times 10^{-10}$ Fr(anklin)

1919 : Rutherford voit le « proton »



1921 : Chadwick -> une interaction forte



1923 : Compton



■ Le photon comme corpuscule



La mécanique quantique (1)



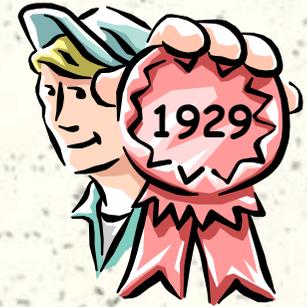
1923 : Louis de Broglie
Dualité onde-corpuscule
Selon les circonstances,
une particule se comporte
en corpuscule **OU** en onde

$$E = \hbar \omega \quad \vec{p} = \hbar \vec{k}$$

1924 : Statistique de Bose-Einstein

1925 : Wolfgang Pauli

Principe d'exclusion (Nobel 45)



La mécanique quantique (2)



1926 : Erwin Schrödinger
Mécanique ondulatoire

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2m} \Delta + V(\vec{x}) \right] \psi(\vec{x}) = E \psi(\vec{x})$$

1933 Prix Nobel pour
Schrödinger et Dirac



1926 : Statistique de Fermi-Dirac

1926 : Max Born (Nobel 1954)

Interprétation statistique



La mécanique quantique (3)



1927 : **Werner Heisenberg**
Principe d'incertitude

$$\Delta x \Delta p > h$$



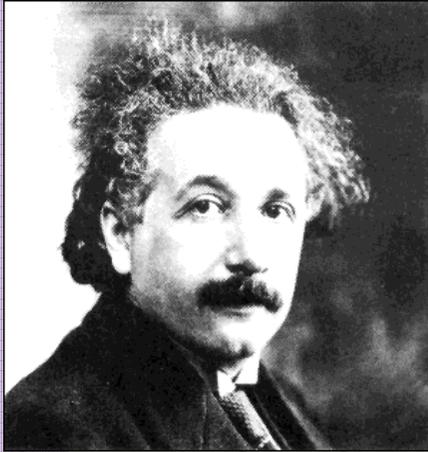
1928 : **Gamow** explique la
radioactivité α par effet tunnel



+ **Wigner**, et d'autres...

Révolution du concept de « particule »

1928 - Bilan



Deux nouvelles théories changent la conception des particules :

- La mécanique quantique
- La relativité restreinte (et générale 1916)

Les premières particules élémentaires :

- Électron (1896) Thomson
- Photon (γ , X) Compton
- Proton (1919) Rutherford
- Et toujours les noyaux à la Mendelév...

Problème de l'isotopie, composition des noyaux

Deux théories à concilier

La mécanique quantique

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2m} \Delta + V(\vec{x}) \right] \psi(\vec{x}) = i \hbar \frac{\partial \psi(\vec{x})}{\partial t}$$

La relativité restreinte

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

Dirac en sera l'artisan...

