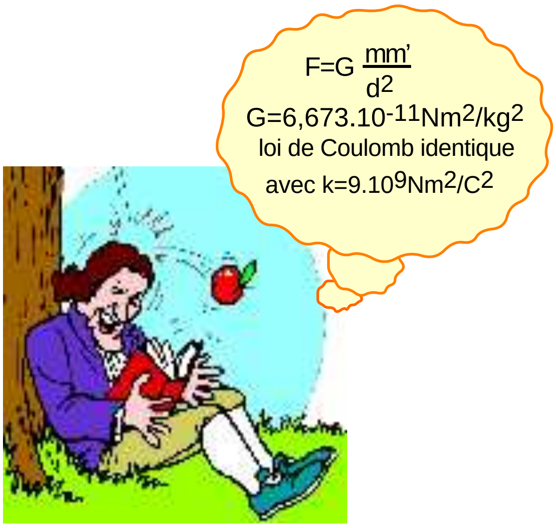
PHYSIQUE

Mécanique

Constante de gravitation $G = 6{,}67.10^{-11}$, attraction électrique -9.10^{9}, $e = -1{,}6.10^{-19}$ Coulomb

Définitions

A partir des notions (non définies) scalaire de masse et vectorielle de force, un système de masse m animé d'une vitesse v, a par définition la quantité de mouvement q = mv, s'il occupe un volume V, sa masse volumique (ou densité) est $\rho = m/V$. Une force F s'exerçant sur la masse m à la vitesse v, a pour puissance le produit scalaire P = Fv, le travail de cette force durant un temps dt est W = Pdt = Fdx si dx est le déplacement du système durant ce temps.



Principe de la dynamique newtonienne
Le torseur des forces extérieures s'exercant sur un système matériel est égal au torseur des quantités d'accélération, soit à la dérivée du torseur des quantités de mouvement.

$$\mathbf{F = m(dv/dt) = dq/dt}$$

Principe de l'action et la réaction : entre deux systèmes, l'action F_{12} du premier sur le second égale la réaction F_{21} en valeur absolue.

$$\mathbf{F_{12} + F_{21} = 0}$$

Energie cinétique (1/2)mv² **:** le travail Fdx d'une force F pendant dt, sur un système, doit lui procurer un accroissement d'énergie dW = Fdx = Fvdt = (dq/dt)vdt = v.dq = mv.dv = $d(mv^2/2)$, c'est pourquoi $(1/2)mv^2$ est nommée énergie cinétique.
Pour un système en rotation, c'est $(1/2)m(r\omega)^2$.
Le travail ne dépend pas du chemin suivi, c'est une différentielle exacte.

Lois de Képler si l'interraction entre deux masses suit la loi de Newton, $F = -GMm/r^2$, alors par rapport au système de masse M, la trajectoire de celui de masse m, est une conique.

La réciproque se démontre également. En prenant des coordonnées polaires (r, θ) centré en M, l'énergie mécanique de m est $E = (1/2)mv^2 - GMmu$ en posant $u = 1/r$, la formule de Binet, pour une force dérivant d'un potentiel, montre que $r^2\omega$ est une constante C et qu'en dérivant par rapport à θ, $F = -mC^2u^2(u + u'')$, alors $u + u'' = GM/C^2$, équation différentielle se résolvant en $r = (C^2/GM) / (1 + e\cos(\theta - \alpha))$ trajectoire conique d'exentricité $e^2 = 1 + 2EC^2/G^2Mm$.
Si e < 1 (E < 0, attraction supérieure à l'énergie cinétique) éllipse de demi-grand axe a = GMm/2E, la période est alors $GMT^2 = 4\pi^2a^3$
Si e = 1, trajectoire parabolique, la vitesse parabolique au sommet est alors $v_p^2 = 2v_c^2$ où v_c vitesse pour une orbite circulaire.
Trajectoire hyperbolique (e > 1), possédant M dans sa concavité dans le cas d'une force attractive et M sur l'autre foyer dans le cas d'une force répulsive.

Période d'un satellite, à l'altitude h, (pour la terre R = 6378 km, M = kg) la force centrifuge doit équilibrer l'attraction, donc $mv^2(R+h) = mg_h$ et $g_h = GM/(R+h)^2$ d'où $v^2 = g_h(R+h)$, si la trajectoire est circulaire, la période est $T = 2\pi((R+h)/gh)^{1/2} = 2\pi[(R+h)^3/GM]^{1/2}$. Plus simplement pour une distance R quelconque : $\mathbf{GMT^2 = 4\pi 2R^3}$

Vitesse d'échappement, situé à la distance R d'une masse M, il faut dépasser $v^2 = 2GM/R$

Energie mécanique, dans le champ de pesanteur terrestre $g = GM/R^2$, l'énergie potentielle mgh utilisée lors d'une chute de hauteur h, équilibre l'énergie cinétique : $W = -mgh + (1/2)mv^2$ reste constante, c'est pourquoi la vitesse acquise est $v^2 = 2gh$.

Mouvement d'un corps lancé à la vitesse v_0 suivant l'angle de tir α : $(x'' = 0, z'' = -g)$ d'où en intégrant $(x' = v_0\cos\alpha, z' = -gt + v_0\sin\alpha)$ puis $(x = v_0\cos\alpha.t, z = (-1/2)gt^2 + v_0\sin\alpha.t)$ parabole de portée $(v_0{}^2/g)\sin 2\alpha$ et de hauteur $(v_0{}^2/2g)\sin 2\alpha$.

Pendule de Foucault la période du pendule de longueur l est $2(l/g)^{1/2}$ et la période de rotation du plan d'oscillation est $24 / |\sin\lambda|$ heures à la latitude λ.

Forces de Coriolis, à cause de la rotation terrestre de vitesse angulaire $\omega = 2\pi/(24*60*60) = 0.729.10^{-4}$ radian/s, il y a déviation vers l'est dans l'hémisphère nord et vers l'ouest, au sud. La déviation d'une masse tombant en chute libre d'un hauteur h à la latitude λ est $(1/3)(2h/g)^{3/2}g\omega \cos \lambda$.

Relativité

Constante de la lumière $c = 3.10^8$ m/s

Equations de Lorentz Si un repère R' (coincidant avec R en t = 0) à une dimension se déplace uniformément à la vitesse v par rapport au repère R, étant donné un point P de coordonnées x au temps t dans le repère R et x' dans R', dans le cas où P est fixe dans R', on a x = vt.
En posant deux axiomes : x' est la fonction polynômiale la plus simple, du premier degré de x et il existe une vitesse limite c alors on démontre :
x' est de la forme x' = kx + m, or pour la position fixe x' = 0 vis à vis du perère R', x = vt, donc m = -kvt et d'autre part à la vitesse limite c : x = ct est équivalent à x' = ct' si t' est le temps mesuré dans R'.
Cela donne x' = k(x - vt) en particulier ct' = kt (c - v) mais de façon duale, dans R' la vitesse de R est -v et la même équation donne x = k(x' + vt') en particulier ct = kt'(c + v).
Ces deux relations donnent $c^2tt' = (c - v)(c + v)tt'$ d'où $\mathbf{k = 1 / \sqrt{(1 - v^2/c^2)} > 1}$
Deux évenements séparés par Δx, Δt dans R et par $\Delta x'$, $\Delta t'$ dans R' satisferont :

$\Delta x' = k(\Delta x - v\Delta t)$ et $\Delta t' = k(\Delta t - v\Delta x/c^2)$, en particulier :

Dilatation du temps Deux évenements simultanés dans R' ($\Delta t' = 0$) ne le sont pas dans R et réciproquement deux évenements de même lieu de R' ($\Delta x' = 0$) donnent : $\mathbf{\Delta t = k\Delta t' > \Delta t}$
Ainsi par exemple un vaisseau bouclant à la vitesse 0.6c pendant 10 ans hors de terre a accompli pour son repère propre un voyage de 8 ans.

Contraction des distances Si $\Delta t = 0$ vu dans R, P se déplaçant à la vitesse v, $\mathbf{\Delta x' = k\Delta x > \Delta x}$

Energie associée à une masse A cause de l'isotropie de l'espace, on démontre que E_c est indépendant de la direction et que c'est une fonction affine de k, $E_c = m_0c^2(k - 1)$.
Par définition l'énergie ΔE développée par une force F appliquée à P le déplaçant de Δx est $\Delta E = F.\Delta x$, la quantité de mouvement d'une masse m à la vitesse v est q = mv, enfin cette force la modifie $F = m(dv/dt) = \Delta q/\Delta t$. Dans le repère R', on écrit $\Delta E' = F.\Delta x' = k(\Delta x - v\Delta t)\Delta E/\Delta x = k(\Delta E - v\Delta q)$ et pour la quantité de mouvement $\Delta q' = F\Delta t' = kF(\Delta t - v\Delta x / c^2) = k(\Delta q - v\Delta E/c^2)$
Si v est toujours la vitesse de R' par rapport à R et P fixe dans R', on a donc en particulier une "énergie cinétique" $\Delta E' = 0$ et $\Delta q' = 0$ d'où si on nomme E_0 l'énergie interne au repos, $E' = E_0 = k(E - vq)$ c'est à dire $E = E_0/k + vq = E_0/k + v^2E/c^2$ car $E = mc^2$ soit :

$\mathbf{E = kE_0 > E}$ de même $q = kvE_0/c^2$, en mécanique classique, si v est négligeable face à c, $q = vE_0/c^2$ or $q= m_0v$ d'où $E_0 = m_0c^2$. Plus généralement $E = km_0c^2 = m_0c^2 + (1/2)m_0v^2 + ...$ grâce à un développement limité (énergie interne + énergie cinétique)

Augmentation de la masse A la vitesse v, le point P de masse m vérifie $q = mv = kvE_0/c^2$ or $E_0 = m_0c^2$ donc **$m = km_0 > m_0$**

Avec la correspondance $E = mc^2$ la masse d'un nucléon vaut 931 MeV.

Loi de composition des vitesses Si P possède maintenant la vitesse u relativement à R' qui a la vitesse v relativement à R, la vitesse w de P par rapport à R est donnée par $x' = k(x - vt) = ut' = ku(t - vx/c^2)$ donc $x - vt = ut - uvx/c^2$ $\quad w = (u + v) / (1 + uv/c^2)$

Si on pose v/c = th a, alors on vérifie que cette loi s'écrit aw = au + av et : $\begin{bmatrix} x' \\ ct' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch}\,\alpha & -\text{sh}\,\alpha \\ -\text{sh}\,\alpha & \text{ch}\,\alpha \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} x' \\ ct' \end{bmatrix}$

Invariance de la forme bilinéaire de Lorentz-minkowski, ayant $\Delta x'^2 - c^2\Delta t'^2 = \Delta x^2 - c^2\Delta t^2$, plus généralement en dimension 4, (x, y, z, t) -> $x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2$ est donc indépendante du repère.

Modèle du gaz parfait

Constante de Boltzmann k = 1,38.10-23J/K

Nombre d'Avogadro Av = $6{,}023.10^{23}$ définit une "mole", constante des gaz parfaits R = k.Av = 8,32 J/K

Système fermé où N particules de masses m n'ont pas d'interraction. C'est le modèle le plus simple où la distance moyenne est très grande face à celle de 10^{-10}m qui est l'ordre de portée des forces inter-moléculaires.

Degré de liberté dl est le nombre de paramètres caractérisant chaque molécule, pour un gaz mono-atomique dl = 3 (la position), gaz di-atomique : dl = 5, tri-atomique : dl = 6

Température T est une mesure de l'agitation moléculaire, elle est définie comme proportionnelle à l'énergie cinétique moyenne.

Pression, la pression est une mesure de l'importance des chocs des particules sur les parois. Si v est la composante de vitesse perpendiculaire à la paroi, la quantité de mouvement est mv_x avant et $-mv_x$ après, la variation est donc $2mv_x$. Pour un volume V entourée par une aire S de N particules, le nombre de chocs par unité de temps est NSv_x/V, la force exercée sur la paroi est donc ce nombre de fois la quantité de mouvement, et la pression est cette force rapportée à la surface, soit :

$p = Nmv_x^2/V$, ceci étant, si le gaz est isotrope, cette vitesse orthogonale v_x à la paroi vérifie $(v_x)^2 = v^2/3$ où v désigne maintenant la vitesse moyenne des particules. On a donc :

$$\mathbf{p = Nmv^2/3V}$$

On en déduit la formule de Bernoulli $pV = Nmv^2/3 = Mv^2/3$ où M est la masse totale du système. Quant à la vitesse du son dans un gaz, elle s'exprime par $(\gamma p/\rho)^{1/2} = v(\gamma/3)^{1/2}$ où $\rho = M/V$.

Energie du système, dans ce modèle, l'énergie est purement cinétique, c'est à dire U ne dépend que de la vitesse moyenne v et de la température T. L'énergie interne est $N(mv^2/2) = 3pV/2$, soit pour un degré de liberté plus général dl :

$$\mathbf{U = dl.NkT/2 \text{ et } pV = NkT}$$

Echange d'énergie du système avec l'extérieur, si le système reçoit une énergie mécanique (W, travail) et une énergie thermique (Q, chaleur), son énergie interne se modifie et :

$$\mathbf{\Delta U = W + Q}$$

La variation d'énergie interne d'un système ne dépend que des états extrêmes (premier principe, dU est une différentielle exacte).

Chaleurs spécifiques, un système de masse M recevant une chaleur dQ augmente sa température par : $dQ = Mc_vdT$ à volume constant (transformation isochore) or $Q = U_2 - U_1 + p(V_2 - V_1)$ le dernier terme étant le travail reçu, $Mc_v = (\partial U/\partial T)_V$

A pression constante (transformation isobare) $Mc_p = (dQ/qT)_p = (\partial U/\partial T)_p + (\partial V/\partial T)_p$

Dans le modèle du gaz parfait, U ne dépend que de T, les dérivée $\partial U/\partial T$ sont les mêmes et comme dV/dT = Nk/p, on en déduit la relation de Mayer :

$$\mathbf{M(c_p - c_v) = Nk = R \text{ et } pV = (\gamma - 1)U}$$

Cette dernière relation, en fonction du rapport des chaleurs spécifiques $\gamma = c_p/c_V$ est déduite de U = dl.RT/2 et $Mc_V = dU/dT = dl.R/2$ d'où $\gamma = c_p/c_V = (2+dl)/dl$, ce coefficient vaut 5/3 pour les gaz monoatomiques et 7/5 pour les diatomiques comme l'air.

Transformation adiabatique (sans échange de chaleur avec l'extérieur), ayant $dU = Q + W$, $W = -pdV$ (travail des forces de pression pour agrandir le volume), $Q = 0$, et $U = dl.pV/2$, on a : $dU = dl/2(Vdp + pdV) = -pdV$ soit $Vdp + \gamma pdV = 0$, $(dp/p) + \gamma(dV/V) = 0$ donc pV^{γ} constant (loi de Laplace).

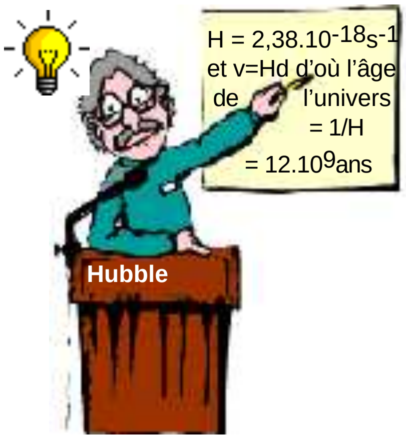
Entropie $S = k.\ln(\Omega)$ où Ω est le nombre de permutations des N particules correspondant au même état global (aux mêmes valeurs des paramètres de chaque particule. S augmente pour atteindre un état d'équilibre. S est additive, si deux systèmes ont des nombres Ω_A et Ω_B, l'ensemble aura $Q_A\Omega_B$ et donc $S_{A+B} = S_A + S_B$.

$$dU = TdS - pdV \text{ d'où } p = -\partial U/\partial V \text{ et } T = \partial U/\partial S$$

Dans une transformation $S_B - S_A \geq \int dQ/T$, (égalité si et seulement si la transformation est réversible) lors d'une transformation adiabatique, l'entropie augmente.
Pour le modèle du gaz parfait $S = Mc_V.\ln TV^{\gamma-1} = Nk.\ln VT^{1/(\gamma-1)}$.

Cosmologie

Constante de Hubble H = 150 000 m/s

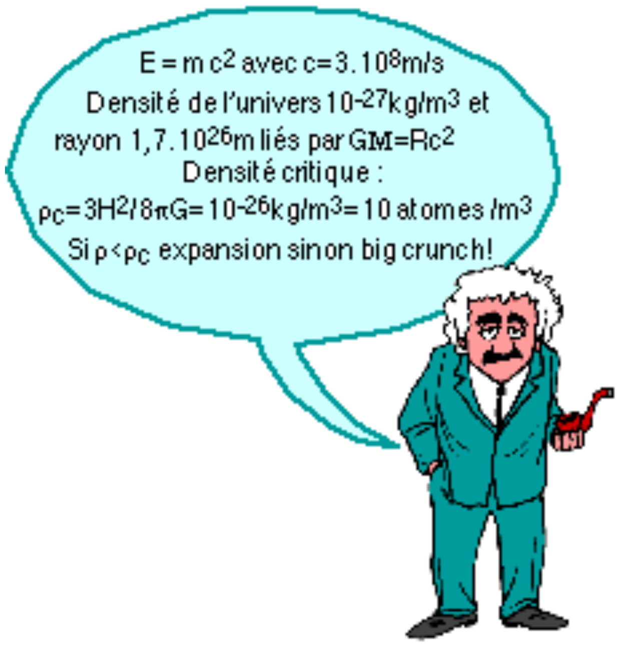


L'expansion de l'univers ne peut être qu'adiabatique ($dQ = 0$), son énergie totale E satisfait $dE = dQ + dW = -pdV$. Comme son volume est $V = 4\pi R^3/3$, on va distinguer, dans dE, les deux formes de matière :

Energie de rayonnement (spin entier : photons, neutrinos ...)
Si e_r est la densité d'énergie rayonnante et que chaque entité a 3 degrés de liberté, la pression provoquée $p_r = e_r/3$, donc :
$dE_r = -p_r dV$ soit : $4\pi(3R^2dR.e_r + R^3de_r)/3$
$= -(e_r/3)(4\pi/3)R^3dR$ soit : $3R^2e_rdR + R^2e_rdR$
$= -R^3de_r$. Or $4dR/R = -de_r/e_r$ donc e_r est proportionnel à $1/R^4$ or e_r est proportionnel à T_r^4 (loi de thermodynamique) donc T_r est proportionnel à $1/R$.

Supposons l'univers de rayon R et de masse M, sa densité est $\rho = 3M/4\pi R^3$, il y a expansion si la vitesse à la "surface" R est supérieure à la vitesse d'échappement qui vérifie $v^2 = 2GM/R$, d'après la loi de Hubble où $v = Hd$, cette condition s'écrit :
$H^2R^2 > 2GM/R$ soit :
$3H^2/8\pi > 3GM/4\pi R^3$ c.a.d. $\rho < \rho_c$ dite densité critique. A l'inverse, si $\rho > \rho_c$ alors c'est une contraction de l'univers (big-crunch).

$$\boldsymbol{\rho_c = 2H^2/8\pi G}$$



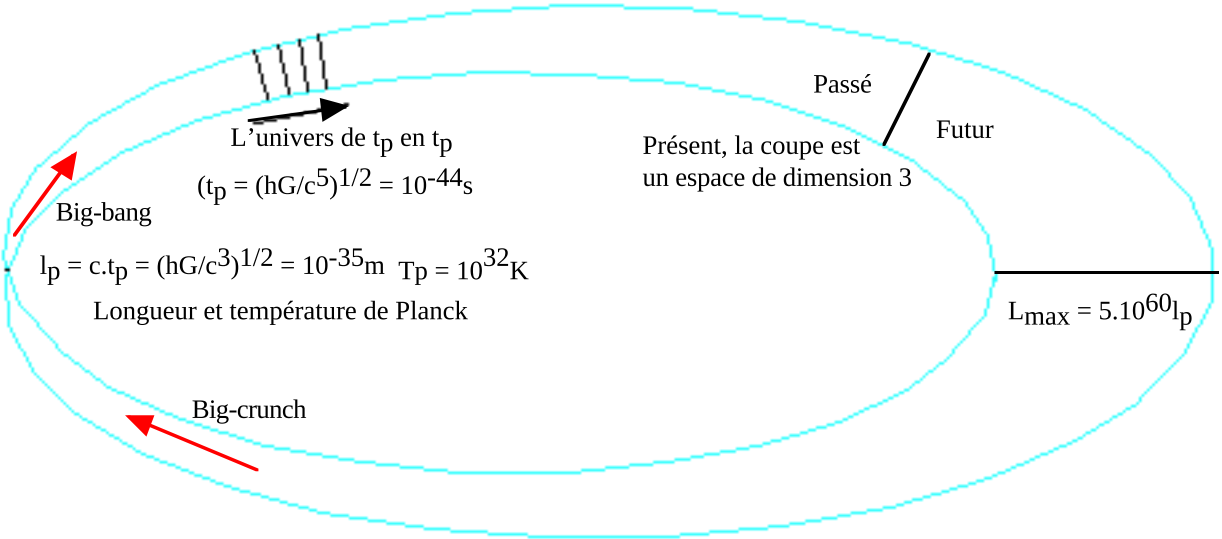
Energie de matière baryonique (spin demi-entier) $e_m = nmc^2 = (3/2)nkT_m$ avec $p_m = nkT_m$ pour n particules de masse m par unité de volume.
$dE_m = -p_m dV$ d'où $3R^2(nmc^2 + (3/2)nkT)dR + R^3(mc^2dn + (3/2)nkTdn + (3/2)nkdT) = -3nkTR^2dR$ mais en supposant le nombre de particules constant $d(4\pi R^3 n/3) = 0$ donc $Rdn = -3ndR$ donc l'équation devient $R(mc^2dn = (3/2)kT + (3/2)nkdT) + (nmc^2 + (3/2)nkT)3dR = -3nkTdR$ soit $dT/T = -2dR/R$ ce qui veut dire que T_m est proportionnel à $1/R^2$
En conclusion, s'il est en expansion, l'univers arrive donc à des températures décroissantes mais avec $T_r > T_m$ donc pas en équilibre thermique. En ce qui concerne les densité $\rho_r = e_r/c^2$ et $\rho_m = e_m/c^2$ des deux formes de matière, ρ_m est proportionnel à $1/R^3$, ρ_r à $1/R^4$ d'où ρ_r/ρ_m proportionnel à $1/R$, en expansion, l'univers passe du rayonnement prédominant à la matière proprement dite.

Masse de Jeans
Ce calcul vaut pour une masse M où l'attraction gravitationnelle équilibre la pression vers l'extérieur. En supposant ρ et T homogènes $G(M/R)^2 = 4\pi PR^2$ donc $R_J = 3(P/\pi G)^{1/2}/2\rho$, et cette masse est $M_J = 9\ (P/G)^{3/2}3/2/\sqrt{\pi}\rho^2 2$.

Mécanique quantique

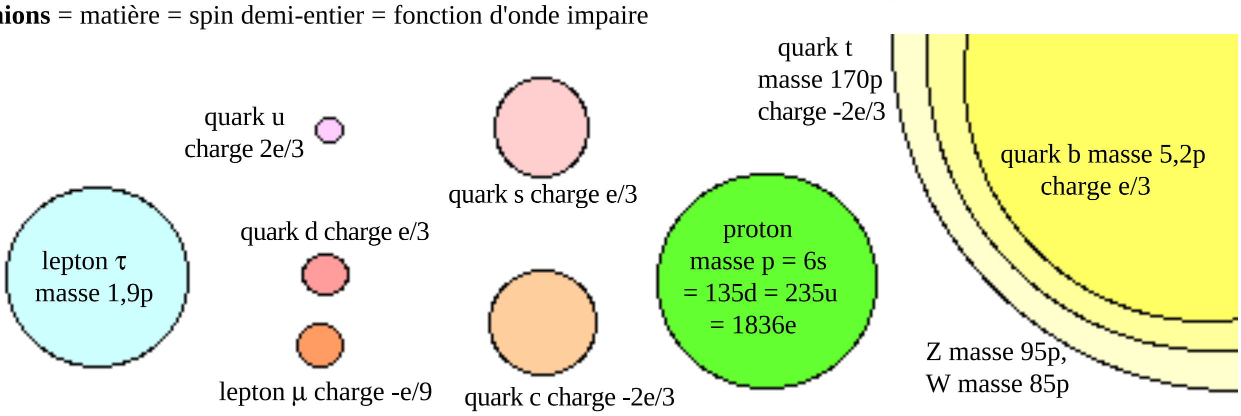
$h/2\pi = 1{,}054589.10^{-34}$kg.m^2/s est le plus petit quantum d'énergie

En admettant que distance, temps, masse, énergie sont des grandeurs discrètes avec des valeurs minimales $l_p = 10^{-35}$m (distance de Planck), $t_p = l_p/c = 10^{-43}$s, $m_p = h/c^2 = 1{,}17.10^{-51}$kg, alors avec ces unités la formule de l'attraction devient $F = mm' / r^2$.
En fait l'espace est un produit à 10 dimensions dont 6 sont sur une hypersphère de circonférence l_p.



Physique des particules

1 eV = $1{,}6.10^{-19}$ J m(proton) = $1{,}673.10^{-27}$kg m(neutron) = $1{,}675.10^{-27}$kg m(électron) = $9{,}11.10^{-31}$kg
Fermions = matière = spin demi-entier = fonction d'onde impaire



Quarks (6 classes u, d, s, c, b, t de charges 2/3, -1/3, -1/3, 2/3, -1/3, 2/3 et 3 couleurs) constituants les :

Hadrons, particules soumises aux int. fortes :

Mésons qq

Pions q¬q spin 0 durée $2{,}6.10^{-8}$s

Baryons qqq (ci-contre)

Leptons (non sensibles aux interactions fortes

Electrons 0,5MeV

Muons 106MeV durée 10^{-6}s

Tau 1784MeV durée $2{,}3.10^{-12}$s

Neutrino 10^{-3}eV charge 0

Bosons = supports de force = spin entier = fonction d'onde paire

Gluons (spin 1) force forte entre quarks

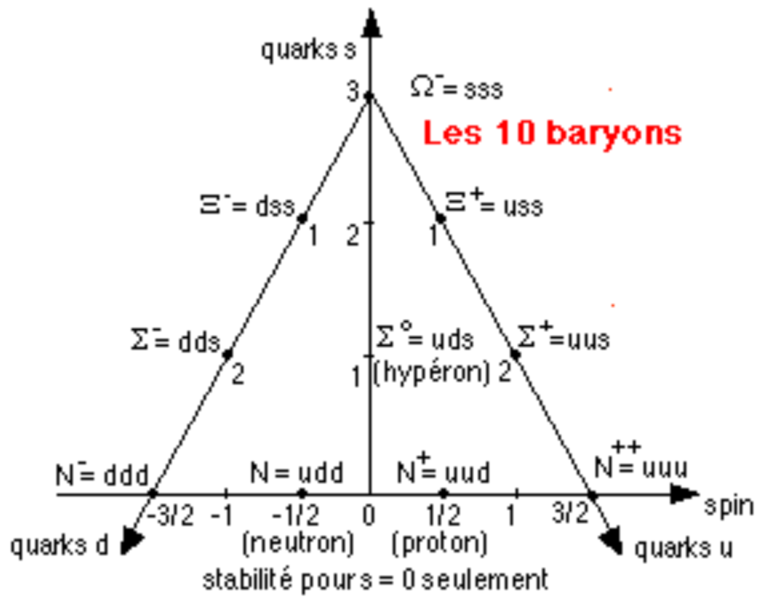
Bosons W^- W^+ Z^0 durée 8.10^{-25}s

(spin 1) interaction faible

Photons (spin 1) force électromagnétique

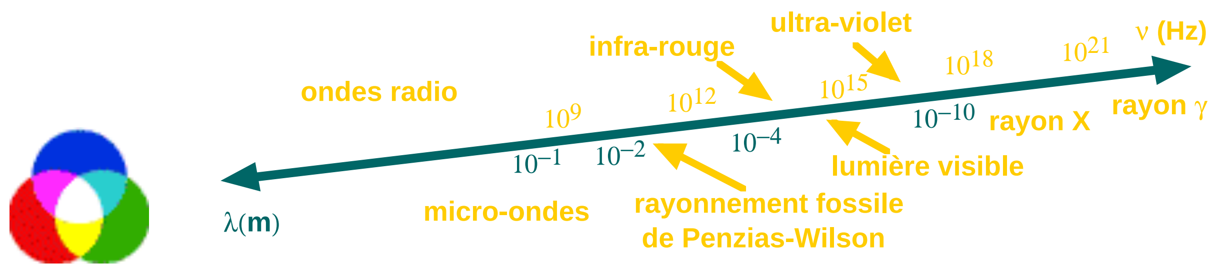
(il y en a 3.10^9 par nucléon)

Gravitons (spin 2) gravitation



Les photons L'énergie d'un photon est E = hν.

Longueur d'onde	Fréquence λν = c	
800 à 2000m	100 kHz	Radio "grandes ondes" se réfléchissant sur l'ionosphère, favorise les communications de longues portées
100 à 800m	0,3 à 3 MHz	Radio "ondes moyennes"
10 à 100m		Radio "ondes courtes"
	40 à 90MHz	Télévision (ondes métriques)
3m	100 MHz	Radio "bande FM"
10 à 30cm	900 à 1800 MHz	Téléphone et radars (ondes décimétriques ou centimétriques)
10cm	3GHz	Micro-ondes des fours
3cm	10^{10}Hz	Rayonnement de Penzias-Wilson (bruit de fond correspondant à une agitation de température 2,74K)
0,8µm à 1mm	3.10^{11} à 4.10^{14}Hz	Infrarouge (utilisée par les lasers)
0,4 à 0,8µm	3,7 à 7,5 10^{14}Hz	Lumière visible
0,2 à 0,4µm	$7{,}5.10^{14}$ 6.10^{15}Hz	Ultraviolet
10^{-12} à 5.10^{-8}m	6.10^{15} à 3.10^{20}Hz	Rayons X
		Rayons γ



L'électron dans l'atome de Bohr, orbitales

Si l'électron de vitesse v est sur une trajectoire de rayon r, pour l'hydrogène (Z = 1) la force d'attraction électromagnétique est $F = e^2/(4\pi\varepsilon_0 r^2)$ où $\varepsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$. Pour qu'il y ait une orbite régulière il faut qu'elle égalise la force centrifuge $F = mv^2/r$. L'énergie potentielle (nulle à l'infini) est $E_p = \int_{[r,\infty[} - e^2/(4\pi\varepsilon_0 r^2)dr = -e^2/(4\pi\varepsilon_0 r)$, l'énergie cinétique est $mv^2/2$, son énergie totale est donc $E = -e^2/(8\pi\varepsilon_0 r^2)$.
Cependant le moment cinétique ne peut être que discret $mvr = nh/2\pi$ où n entier est le "nombre quantique principal" et $h = 6{,}626.10^{-34}$J/s, l'énergie devient $-me^4/(8\varepsilon_0{}^2h^2n)$ pour le niveau n et doit être multiplié par Z^2 pour les autres corps. En particulier si l'électron passe de la couche n = 2 à n = 1, il libère une énergie $E_2 - E_1 = me^4/(8\varepsilon_0{}^2h^2) = h\nu$ où ν est la fréquence du photon émis. Le rayon de la plus basse énergie (n = 1) est $r = \varepsilon_0{}^2h^2/(\pi me^2) = 0{,}0529.10^{-10}$m.

La longueur d'onde Ψ d'un électron d'énergie E, soumis au potentiel V, dont $|\Psi|$ donne la probabilité de se trouver au point où Ψ est calculée, permet de déterminer les régions (orbitales) où la probabilité est la plus forte en résolvant l'équation de Shrödinger.

Schrödinger a dit :

$\Delta\psi + 8\pi^2 m(E - V)\psi / h^2 = 0$

Le niveau d'énergie d'un électron dépend du nombre quantique principal n et du nombre cinétique lc qui donne le moment cinétique $h(lc(lc+1))^{1/2}/2\pi$ pour $0 \leq lc < n$. L'ordre de remplissage se fait suivant n + lc avec priorité pour n. Enfin le nombre quantique magnétique est un entier entre -lc et lc (2lc+1 valeurs), et 2 valeurs à chaque fois $\pm 1/2$ pour la projection du spin.
La couche n (les couches sont nommées K, L, M, N ...) détermine donc les sous-couches 0, 1, 2, ... (nommées s, p, d, f ...) chacune ayant 2(2lc+1) places donc respectivement 2, 6, 10, 14, 18, 22,... la couche n a donc au maximum $2n^2$ électrons.
Dans la table de Mendeléiev, chaque ligne débute le remplissage d'une nouvelle couche et chaque colonne correspond à une même disposition des sous-couches de la dernière couche, ainsi les alcalins (première colonne ns à demi pleine et la seconde ns pleine), la dernière colonne (gaz rares) sous-couche np^6 pleine et l'avant-dernière, les halogènes np^5. Par exemple Hf 72 de formule $1s^2 2s^2 p^6 3s^2 p^6 d^{10} 4s^2 p^6 d^{10} f^{14} 5s^2 p^6 d^1$.
Les lignes du tableau correspondent au remplissage de :

Ligne 1, 1s de H 1 à He 2
Ligne 2, 2s2p de Li 3 à Ne 10 de formule $1s^2 2s^2 p^6$ en passant par le carbone C 6 : $1s^2 2s^2 p^2$
Ligne 3, 3s3p : Na 11 à Ar 18
Ligne 4, 4s3d4p : K 19 à Kr 36
Ligne 5, 5s4d5p : Rb 37 à Xe 54
Ligne 6, 6s4f5d6p de Cs 55, La 57 débute 4f de Ce 58 à Yb 70,
puis 5d de 71 à 80 et 6p jusqu'à Rn 86
Ligne 7, 7s5f6d7p de Fr 87, par exemple l'actinide (Ac 89) débute 5f