

9 ANNEXES

9.1 REPONSES AUX PROBLEMES

Principes Physiques

2.1 L'atome d'hydrogène de Bohr

- a) e^- sur orbites circulaires autour du proton, moment angulaire quantisé
- b) $r_n = n^2 \frac{4\pi\hbar^2\epsilon_0}{m_e q^2}$; $r_1 = \frac{4\pi\hbar^2\epsilon_0}{m_e q^2} = 0.529 \cdot 10^{-10} \text{ m}$
- c) $E_{\text{tot}} = \frac{-mq^4}{8\epsilon_0^2 n^2 \hbar^2}$
- d) $E_{\text{pot}} = \frac{-mq^4}{4\epsilon_0^2 n^2 \hbar^2}$; $E_{\text{cin}} = \frac{mq^4}{8\epsilon_0^2 n^2 \hbar^2}$
 E_{cin} est $-1/2$ de E_{pot} : en moyenne temporelle, le theorme du viriel est valide comme pour tout système de points massiques soumis à une force $1/r^2$
- e) $\Delta E_{H\alpha} = -E_0(1/9 - 1/4) = 1.89 \text{ eV} = 6562.78 \text{ \AA}$
- f) une charge oscillante ($\ddot{p} \neq 0$) rayonne \Rightarrow perte d'énergie, l'électron tombe sur le proton. le modèle de Bohr n'est pas réaliste, mais très utile et extrêmement précis (raies).

2.2 Formes des Planètes

- a) Cf.géopotential: Terre aplatie aux pôles \Rightarrow altitude de la source $<$ celle de l'embouchure.
- b) On équilibre pression limite et pression à la base d'un tel édifice $h_{\text{max}} = S/\rho \cdot g$
- c) $h_{\text{max}} \approx 10 \text{ km}$ sur Terre et $h_{\text{max}} \approx 47 \text{ km}$ sur Io.

2.3 Les anneaux de Saturne

- a) Conservation du moment angulaire : orbites hors plan resultent dans collisions \Rightarrow perte d'énergie, perte de moment angulaire.
- b) Effet Doppler. Saturne tourne comme un corps solide, les anneaux comme des satellites sur orbites Képlériennes.
- c) $d_R = \sqrt[3]{\frac{6M}{\pi\rho}}$
- d) Limite de Roche: $d_R \approx 100000 \text{ km}$. Les anneaux se trouvent bien ds la limite de Roche.
- e) $B_s \cdot S_s \cdot (1-A) = B_p \cdot S_p$
- f) $T_p = \sqrt[4]{T_s^4 \cdot \frac{r_s^2}{4d^2} \cdot (1-A)}$
- g) $T_p \approx 57 \text{ K}$

2.4 La force centrifuge dûe à leur rotation autour de la Terre compense la force d'attraction gravitationnelle.

2.5 L'effet de gravitation différentielle varie de manière linéaire avec la masse (le Soleil est $2.7 \cdot 10^7$ plus massif que la Lune), mais de façon inverse au cube de la distance (la lune est 400 fois plus proche que le Soleil; $400^3 \approx 6.1 \cdot 10^7$).

2.6 a) 2, b) 1

2.7 Le bourrelet est entraîné par la rotation de la Terre: décalage entre la culmination et la marée haute. Dissipation d'énergie ds marrées \Rightarrow freine la rotation terrestre - conservation du moment angulaire \Rightarrow la Lune s'éloigne de la Terre. (Aussi, la Lune peut être à l'opposé de la Terre et on observera quand même une marée haute.)

2.8 Il y a conservation du moment angulaire. Journée augmente de 0.02 ms/an. Calculer moments angulaires de Terre et Lune, calculer variation dûe à augmentation

journée et en déduire augmentation annuelle du rayon de l'orbite. Calcul simpliste: égaliser les variations donne 1.1 cm/an environ. Calcul avec formule différentielle 2.24: 5.48 cm/an. Valeur réelle: 4 cm/an.

Attention les formules de calcul des moments angulaires sont différentes pour une planète et un point massique!!

2.9 L'influence de la lune

- a) Attraction gravitationnelle ($\sim M_L/r^2$) ou gravitation différentielle ($\sim M_L/r^3$). Dans les deux cas, il n'y a pas d'influence des phases. Si l'influence du soleil est ajouté : Pleine Lune / Nouvelle Lune - effets de marées de Lune et Soleil s'ajoutent.

b) $\Delta a \sim m/d^3$

	d	m	m/d ³
lune	3,844 10 ¹¹ m	7,35 10 ²⁰ kg	1.3 10 ⁻¹⁴ kg/m ³
camion	500 m	40'000 kg	3.2 10 ⁻⁴ kg/m ³
prof	5 m	70 kg	0.56
livre	0,5 m	1 kg	8

2.10 $\sqrt[3]{\frac{6M}{\pi\rho}} = 15'000 \text{ km}$ estimation simpliste

$$\sqrt[3]{\frac{11.1M}{\pi\rho}} = 18'400 \text{ km} \text{ Limite de Roche}$$

2.11 Independence Day

- a) $M_v d_v^3 / M_1 d_v^3 \approx 6350$
- b) $\rho_L = M/V = 3M_L/4\pi r^3 = 3319 \text{ kg/m}^3$
 dimension vaisseau $r_v = 1016 \text{ m}$
 hauteur limite $h = 3S/4\pi\rho^2 G r_v \approx 300 \text{ k}$
 \Rightarrow masse sera près de la forme sphérique aussi, le vaisseau est à l'intérieur de la limite de Roche ($d_r \approx 18000 \text{ km}$!)

2.12 Les structures de l'Univers

- a) La droite de pente 1/3 indique que les corps sont constitués d'une matière de densité \sim constante ($M \sim \rho R^3$). Les objets de notre macrosysteme et jusqu'aux planètes du système solaire sont constitués d'atomes.
- b) Au delà d'une certaine qté de matière la force de gravitation est dominante par rapport aux forces interatomiques (em) et la forme sphérique équipotentielle est adoptée: les formes géométriques quelconques ne sont plus possibles.

$$r_m = \sqrt{\frac{3 \cdot S}{4\pi\rho^2 G}} \approx 350 \text{ km}$$

- c) matière degenerée (naines blanches) - étoile maintenu par la pression est due aux électrons qui doivent satisfaire au Principe de Pauli.

- d) l'énergie cinétique du gaz (thermique) s'oppose à la gravitation.

e) $L_o = 4\pi R_o^2 \cdot \sigma \cdot T_o^4 \approx 4 \cdot 10^{26} \text{ W}$

- f) fusion de l'Hydrogène (p-p)

g) densité du noyau atomique $\sqrt[3]{10^{57}} \cdot 10^{-15} \text{ m} \approx 10^4 \text{ m}$

- h) densité du TN engendre une attraction gravitationnelle suffisante pour que $v_{\text{ech}} > c$

i) $\mathfrak{R} = 2GM/c^2$ avec $v_e = c$ (photons)

- k) planètes - satellites

planètes - anneaux

étoiles - planètes

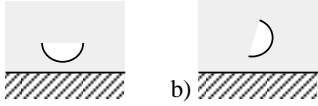
amas - étoiles

Galaxie - amas, étoiles

Amas de galaxies - galaxies

L'observation en astrophysique

- 3.1 Observation de l'angle entre soleil et la demie-lune.
- 3.2 Aristarque de Samos
- $D_1 \approx$ rapport du temps d'entrée ds l'ombre et durée pdt laquelle lune reste ds ombre de terre. $D_1 \approx t/T \approx 5400$ km
 - l'ombre terrestre est conique, la lune ne passe pas au centre de l'ombre



- 3.3 a) b)
- 3.4 I) faux; II) vrai; III) faux; IV) faux; V) vrai; VI) vrai; VII) vrai; VIII) vrai.
- 3.5 Une journée sur Mars
- Phobos se lève à l'Ouest et se couche à l'Est 2 fois pdt la journée et Deimos se lève à l'Est et se couche à l'Ouest env. une semaine plus tard.
 - Phobos sera freiné ($7h39 < 24h37$) et Deimos sera accéléré ($30h18 > 24h37$) par effet de marées: conservation du moment angulaire.
 - Observation des phases : possible pour Vénus, Terre, Lune, Phobos; impossible pour Jupiter
- 3.6 Le cuisinier: Si une des cornes du croissant touche horizon: il fait jour. C'est la demi lune qui se couche à minuit.
Le voleur: rien d'incompatible
La femme: La Petite Ourse n'est pas ds l'écliptique de Vénus peut pas être ds la Petite Ourse. La Lune n'est pas ds son dernier quartier si elle se couche à minuit.
L'amant: : la Lune se couche à l'Ouest (Orient=Est). A minuit, la Lune couchante n'est pas pleine et Vénus ne peut pas être au zénith mais sous l'horizon (orbite intérieure). Elle ne clignote pas.

- 3.7 D'après l'éclairement de la lune, il fait jour ...
- 3.8 Soleil, Terre et lune ne sont pas forcément alignés: les orbites de la Lune et de la Terre ne sont pas ds le même plan.

- 3.10 Combien pèse un soleil ?
- égal force centrifuge et attraction gravitationnelle pour le compagnon $\Rightarrow M = r^3 \omega^2 / G$
 - Sans compagnon : étude du passage d'une sonde spatiale à proximité de l'astre..

3.11 $M_{lune} = \omega^2 d^3 / G = 7.5 \cdot 10^{22}$ kg

- 3.12 spectroscopie
- position \Rightarrow identification d'un élément, d'une molécule
intensité de la raie \Rightarrow abondance des éléments
décalage de la raie \Rightarrow vitesse relative
élargissement de la raie \Rightarrow température ($\rightarrow p, \rho$)
absorption / émission \Rightarrow grad T, (\rightarrow densité)
 - voir Fig 3.6

3.13 Etes-vous brillant ? $L_{moi} \approx 2\pi r \cdot \sigma T^4 \approx 700W$.

- 3.14 Paramètres stellaires
- $D = 1/0.09 = 11$ pc = $2.3 \cdot 10^6$ UA
 - $T = 2.89 \cdot 10^{-3}$ [m·K] / $686 \cdot 10^{-9}$ m ≈ 4210 K
 - $L = L_o (I/I_o)(D/D_o)^2 = 169 L_o$; $R = (L/4\pi\sigma T^4)^{1/2}$
 $R/R_o = ((L/L_o)/(T/T_o)^4)^{1/2} = (169 / 0.27)^{1/2} = 24$

3.15 au tribunal : CAS N° 4 900 F
 $dv/v = 1/4.5 = 2v/c \Rightarrow v = 133.2$ km/h

3.16 $dv/v \approx d\lambda/\lambda = v/c$; vitesse expansion $v = 23$ km/s

- 3.17 étoile a (type O, $\sim 30^7$ 000 K) plus chaud et plus jeune que b (type K, ~ 4000 K)
Processus de combustion nucléaires probables:
a) cycle p-p ou CNO b) p.e. proc. triple α

- 3.18 Lumière Zodiacale
- poussières zodiacales / reémission du rayonnement solaire absorbé
 - $\lambda_{max} \approx 12 \mu$ (I); 24μ (II)
 - $\sigma \cdot T_s^4 \frac{4\pi r_s^2}{4\pi d^2} \cdot \pi r_p^2 \cdot (1 - A) = \sigma \cdot T_p^4 \cdot 4\pi r_p^2$
 - $d = \frac{T_s^2 r_s}{2T_p^2} \cdot \sqrt{(1 - A)} \approx 1.4$ UA (I) ; 5.5 UA (II)
 - dans un disque de poussière d'une certaine épaisseur, les poussières à 240 K (I) sont plus proches et occuperont donc une bande plus large que les poussières plus froides (II, 120 K) qui sont plus à l'extérieur (\sim Jupiter) du système solaire.



- 3.19 51 Pegasi
- Dans le système binaire étoile-planète, l'étoile tourne autour du centre de masse commun dans 4.2 jours, les raies spectrales sont décalées vers le bleu/rouge indiquant que 51 Peg s'approche/s'éloigne avec une vitesse de ~ 55 m/s.
 - $d_{p51} = d_o(I_{51}/I_o)^{1/2} \approx 45$ al
 - $d\lambda/\lambda = v/c \Rightarrow d\lambda \approx 10^{-3}$ Å
 - rayon 51Peg-CM : $a_1 = P v / 2\pi \approx 3 \cdot 10^6$ m
 $a_{tot} = a_1 + a_2$ (51 Peg-planète)
 $= (M_{sys} P^2 / K)^{1/3} = 7.6 \cdot 10^9$ m
 $M_2 = M_1 \cdot a_2 / a_1 = 8 \cdot 10^{26}$ kg $\approx 130 M_{terre}$
51 Peg est une étoile du type G2, comme le Soleil

Physique du Système Solaire

- 4.1 $T'_v \sim T_t(1/0.732) \cdot (0.3/0.78) \approx 0.7 \cdot T_t \Rightarrow$ pas la distance, mais l'effet de serre.
- 4.2 Atmosphères
- Jupiter : froid, massif \Rightarrow H, He restent : atm. primaire; Terre : plus chaude, peu massive, perte de H, He, degazage, biologie \Rightarrow atm. secondaire.
 - Mercure : chaude \Rightarrow tgaz s'échappent, pas d'atm. Titan : froide, degazage, chimie ... \Rightarrow atm secondaire.
 - pouvoir de rétention atmosphérique dépend de T et M.
 - $V_{ech} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$

4.3 $v_{\text{m}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_M}}$ $k=1.38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$, $m_M = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

retenus	Jupiter	Mars	Mercure
$v_{\text{ech}} \text{ H [km/s]}$	1.6, oui	3.0, non	4.2 non
$v_{\text{ech}} \text{ H}_2 \text{ [km/s]}$	1.1, oui	2.1 non	3.0 non
$v_{\text{ech}} \text{ CO}_2 \text{ [km/s]}$	0.24, oui	0.44, oui	0.63 non

ou : calcul de la masse des particules retenus $A_M > \frac{108kT}{\mu v_e^2}$
 $A > 0.03$ $A > 13$ $A > 34$

4.4 Cherche question, désespérément

- a) Où est cette eau aujourd'hui ? Sous quelle forme ? Comment pourrait-on la détecter ? Y a-t-il des traces de vie sur mars ? Pourquoi / pourquoi pas ?
- b) La vitesse de la matière éjectée sur Io est-elle supérieure à la vitesse d'échappement ? Y a-t-il des gaz ds l'espace à proximité de Jupiter ? Si oui, dans quelle longueur d'onde les observer ?

4.5 Surfaces planétaires et transferts d'énergie

- a) Processus: tectoniques, volcaniques, de gradation, et bombardement.
- b) sources : radioactivité, chaleur enfermée depuis la formation, marées
transport \approx convection : volcanisme, tectonique des plaques
- c) énergie thermique interne \sim volume ($\sim r^3$), refroidissement du corps \sim surface ($\sim r^2$)
- d) L'activité d'Io ne peut pas s'expliquer par radioactivité (comme la terre, voir b).
Ganymède impose à Io une d'orbite elliptique \Rightarrow les marrés provoqués par Jupiter se déplacent sur Io (spin/orbit = 1) \Rightarrow déformations \Rightarrow chaleur.
résultat net : dissipation d'énergie orbitale \Rightarrow énergie thermique.

4.6 La surface de la Lune

- a) les géologues
- b) ce qui dimensionne le cratère est l'énergie cinétique du projectile libérée lors de l'impact (\gg explosion nucléaire, cf. Meteor Crater)
- c) A : forte craterisation intense, type "continent"
B : faible craterisation, type "mer"
- d) A: traces originales du bombardement météoritique intense pendant les premiers 10^9 années du sys. solaire
B: les traces du bombardement originales sont effacés par la lavé qui a remonté suite à un impact plus récent.
- e) B plus jeune qu'A. voir d)

4.7 Halley

- a) contrairement au noyau ($\sim 10 \text{ km}$), la tête (10^5 km) et la queue ($> 10^7 \text{ km}$) sont facilement observable.
rayonnement et vent solaire \Rightarrow degazage
- b) perte de masse seulement lors des passages proche du soleil. néanmoins, les comètes à courte période ne vivent pas longtemps.

4.8 La comète Hyakutake

Queue ds la direction Soleil-Position considérée et ds le sens opposé au Soleil. Elle est d'autant plus importante que la comète est plus près du Soleil.

4.9 De quoi sont faits les voeux ?

- a) la terre rencontre l'essaim cométaire toujours au même endroit sur son "tour" annuel.
- b) effet de parallaxe.

- c) avant le lever du soleil : car observation vers apex de Terre (cf. pare-brise"
- d) flux lumineux $f = 4 \cdot 10^{-9} \text{ W / m}^2 \text{ s}$;
 $E = f 4\pi d^2 \Delta t \epsilon \approx 500'000 \text{ J}$; $m = 2E/v^2 \approx 1 \text{ g}$

Physique stellaire

- 5.1 Combien de temps le soleil brillera ? Voyez vous même !
- a) On mesure l'angle β entre et Lune et Soleil à demie-lune Lune. $d_o = d_l / (90^\circ - \beta)$
- b) équilibre gravitation - force centrifuge (pour la Terre)
 $M = v^2 d_o / G \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
- c) d_a distance lampe-main : $\sim 7 \text{ cm}$
 $L_o = L_a \cdot (d_o / d_a)^2 \approx 4 \cdot 10^{26} \text{ W}$
- d) $E_H = c^2 \cdot (4M_H - M_{He}) / 4 \approx 10^{12} \text{ J}$
nombre d'atomes ds soleil : $n = M_o / M_H \approx 10^{57}$
 $T_o = n E_H / L_o \cdot 10 \approx 2.5 \cdot 10^{17} \text{ s} \approx 10^{10} \text{ ans}$

5.2 Réactions Nucléaires

- a) voir Fig 5.3
- b) p-p et CNO : $dE \triangleq 4.8 \cdot 10^{-29} \text{ kg} \triangleq 4.3 \cdot 10^{-12} \text{ J}$
triple α : $dE \triangleq 1.3 \cdot 10^{-29} \text{ kg} \triangleq 1.2 \cdot 10^{-12} \text{ J}$
- c) la combustion de l'H (p-p, CNO $\sim 10^{-12} \text{ J}$ par nucléon) peut fournir 10 fois plus d'énergie que la combustion de l'He ($\sim 10^{-13} \text{ J}$ par nucléon) \Rightarrow les étoiles passent la plus grande partie de leur vie sur la sequence principale (H \rightarrow He) avant de devenir des Géantes Rouges ($3\alpha \rightarrow \text{C}$)
- d) Chaîne p-p se produit au centre du Soleil - les photons proviennent de la surface \Rightarrow détecteurs de neutrinos.
- e) $N_{\text{Vtot}} = 2 \cdot L_o / dM \cdot c^2 = 1.9 \cdot 10^{38} \text{ s}^{-1}$
 $N_{\text{Vterre}} = N_{\text{V}} / 4\pi D^2 = 6.8 \cdot 10^{14} \text{ v / s} \cdot \text{m}^2$ (personne $\approx 1 \text{ m}^2$)

5.3 Les réservoirs d'énergie nucléaire des étoiles

- a) masse des nucléons au sein du noyau (interaction forte).
- b) p-p, CNO : H \rightarrow HE
triple α : He \rightarrow C
combustion du C, O, ... Si : nucléosynthèse elmnts $<$ Fer
chaque fois un reservoir nucléaire épuisé, la gravitation prend le dessus \Rightarrow effondrement, T_{noyau} monte \Rightarrow prochain seuil de réaction nucléaire
- c) étoile type solaire (stades finales : GR, naine blanche) : T_{noyau} ne permet pas la synthèse d'éléments au delà du C et O.
étoile massive (stades finales : supernova, étoile à neutrons) : combustion du C, O, ... Si, et au delà du fer...
- e) nucléosynthèse explosive jusqu'aux éléments les plus lourds (Au, U), p.e par processus s, r (bombardement neutronique, moins(s)/plus(r) rapide que la décroissance β)
- g) minimum de masse par nucléon \Rightarrow fer est l'élément le plus stable. On gagne de l'énergie par la fusion des éléments moins lourds qu'Fe, ou la fission des éléments plus lourds que le Fe

5.4 Supernova

- a) théorème du viriel: il faut que le système perde la moitié de l'énergie gravitationnelle libérée dans l'effondrement. Les neutrinos n'interagissent quasiment pas avec la matière; ils s'échappent et emportent de l'énergie \Rightarrow contraction possible.
- b) $r_p < cT / 2\pi \approx 1432 \text{ km}$
- c) $r_p < (GM/\omega^2)^{1/3} \approx 145 \text{ km}$
- d) $r_p < \sqrt{R^2 \cdot T / T_o} \approx 82 \text{ km}$
- e) $r_p \approx R_{\text{Fe}} (M_o / M_{\text{Fe}})^{1/3} = 16 \text{ km}$
- f) $E = GM^2 / 4R = 3.3 \cdot 10^{45} \text{ J}$.
 $\tau = 0.35 \text{ ans}$ soit $\tau = 4.2 \text{ mois}$.

5.6 Trou noir

- a) Loi de Kepler pour systèmes binaires $a^3 = (M_1 + M_2)P^2$
- b) $mv_e^2/2 - GmM/r = 0 \Rightarrow R = 2GM/c^2$ avec $v_e = c$ (photons)
- c) $R_{\text{cyg}} = 2 * 6.67 \cdot 10^{-11} * 15 * 2 \cdot 10^{30} / 9 \cdot 10^{16} = 44 \text{ km}$
- d) variations $\Rightarrow 10^{-3} - 10^{-4} \text{ sec} \Rightarrow \sim 30 \text{ km}, \Rightarrow \text{EN ou TN}$
avec $R_{\text{cyg}} = 44 \text{ km} \Rightarrow \text{TN}$

5.7 La formation des étoiles

- a) Emissions infrarouges dues à excitation des poussières du nuage par rayonnement UV émis par étoiles jeunes.
- b) $\lambda_{\text{max}} = b/T \Rightarrow T = b/\lambda_{\text{max}}. T = 28.9 \text{ K}$
- c) On égale le rayonnement absorbé et le rayonnement émis par les poussières du nuage : voir XX
- d) $\sigma \cdot T_{\text{étoile}}^4 \cdot 4\pi R_{\text{étoile}}^2 = \sigma \cdot T_{\text{nuage}}^4 \cdot 4\pi R_{\text{nuage}}^2$
 $R_{\text{nuage}} \approx 3.4 \cdot 10^{15} \text{ m}$

5.8 Le cycle de la matière

- a) effondrement du nuage protostellaire (théorème du viriel, voir b), au delà de 10^7 K , déclenchement du cycle p-p / CNO : l'étoile est sur la séquence principale. Après consommation du H au noyau \rightarrow géante rouge, puis supergéante. Processus de combustion dans des couches concentriques : triple α , fusion C-C, O-O, fusion du Si jusqu'au Fe.
Des pertes importantes d'énergie cinétique permettent que la gravitation prenne le dessus. Matière dégénérée - de plus en plus relativiste. En se transformant en matière neutronique, le noyau implode. Rebondissement du choc sur EN - explosion des couches externes \Rightarrow Supernova.
- b) Théorème du Viriel: $E_{\text{pot}} + 2E_{\text{cin}} = 0$. Pour que l' E_{pot} puisse diminuer (effondrement), 1/2 de l'énergie cinétique "gagnée" doit être évacuée \rightarrow p.e par rayonnement en ou par perte de v; l'autre moitié augmente l'énergie thermique de l'étoile. Les pertes d'énergie cinétique : photodésintégration du Fe, matière dégénérée relativiste (Limite de Chandrasekhar : $1.4 M_{\odot}$) \rightarrow décroissance β^- inverse : $p+e \rightarrow n+v$; les v partent, E cinétique baisse encore plus \rightarrow implosion
- c) Bilan : a) un "résidu inerte" (étoile à neutrons, pulsar ou trou noir) qui ne participe plus de manière déterminante au cycle de la matière. b) le reste de SN : un nuage sphérique, enrichi en éléments lourds. Une étoile massive de $10 M_{\odot}$ vit "seulement" $T_m \sim 10^8 \text{ ans}$; $T_m \ll$ âge de la Galaxie bilan; le MIS était/est donc constamment enrichi par les restes de SN. Nous y sommes passés ...
- d) Après l'effondrement initial (voir a), une étoile de env $1 M_{\odot}$ passe la plus grande partie de sa vie (10^9 ans) sur la séquence principale (H \rightarrow He) avant de devenir une Géante Rouge; maintenant, avec deux zones de combustion ($3\alpha \rightarrow \text{C}$ au centre, pp dans une couche intermédiaire), l'étoile peut passer par des phases d'instabilité (oscillations) \Rightarrow l'enveloppe reçoit assez d'énergie cinétique pour se libérer : nébuleuse planétaire. résidu : naine blanche (matière dégénérée)
- e) voir Fig 5.2

La Galaxie

6.1 Combien d'étoiles, une Galaxie

- a) A l'intérieur, la vitesse de rotation augmente avec la masse galactique incluse (r), une fois le gros de la masse comprise (R), la courbe reflète des vitesses képlériennes.
- b) $R = 7 \text{ kpc}$.
- c) Equilibre entre attraction gravitationnelle et force centrifuge $M = v^2 r_{\text{SCG}} / G \approx 10^{11} M_{\odot}$

6.2 Les couleurs de la Galaxie

Lumière visible: lumière émise par les étoiles de notre Galaxie qui se trouvent essentiellement sur la séquence principale - la lumière de la combustion de l'H !
Domaine IR: rayonnement thermique ($\sim 120 \text{ K}$) re-émis par les poussières zodiacales (forme de S) et galactiques. Chauffage par le rayonnement visible/UV du soleil/étoiles.

Car les IR sont peu absorbés dans la Galaxie, nous voyons à travers la Galaxie \Rightarrow disque rel. mince

X basses énergie: Bremsstrahlung des restes de supernovae (bulles, source : SN, énergie cinétique des fronts de chocs).

Corrélation faible entre visible et IR (a) lumière zodiacale très faible en visible, b) se ne sont pas les mêmes étoiles qui chauffent les poussières, car en visible nous ne voyons pas très loin à cause de l'absorption galactique).

Corrélation négative entre X et IR galactique. Les gaz/poussières qui émettent en IR, absorbent les X mous.

6.3 Vision de l'Univers

Univers géocentrique (terre au centre, p.e Ptolémée)

Univers héliocentrique (soleil au centre de l'Univers)

Univers de Kapteyn (soleil au centre de la Galaxie)

Univers Galactique (tout les nébuleuses dans la Galaxie)

9.2 DEFINITIONS ET CONVENTIONS

Albédo

rapport de l'intensité lumineuse réfléchie (dans toutes les directions) par une sphère, sur l'intensité de la lumière parallèle qui l'éclaire.

angle de phase : l'angle Soleil-Objet-Terre.

année lumière (al)

distance parcourue par un photon dans le vide en une année (9.46 · 10¹⁵ m)

année sidérale

durée qui sépare 2 passages successifs de la Terre en un point où le Soleil semble en conjonction avec une étoile lointaine (365 j 6 h 8 min)

année tropique

durée qui sépare 2 passages successifs de la Terre au point γ (365 j 5 h 48 min)

antimatière

En relativité restreinte, on écrit pour l'énergie totale d'une particule : $E^2 = P^2 + M^2$ (où, impulsion $P = pc$, masse $M = mc^2$). L'équation pour E (2^{ème} degré) admet deux solutions, dont une avec des états d'énergie négatifs ! => les particules doivent exister en paires (matière / antimatière; p.e. électron e⁻, positron p⁺).

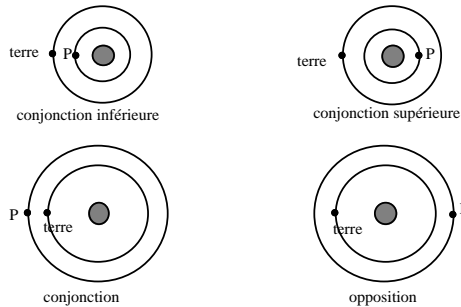
Particules et antiparticules ont la même masse, les mêmes demi-vies, des charges opposées. Quelques particules électriquement neutres sont leurs propres antiparticules (p.e. photon).

brillance B_v :

puissance rayonnée par une source lumineuse selon une direction déterminée par unité de fréquence dν, unité d'angle solide dΩ et unité de surface dA

$$B_v = dF_v / d\Omega \quad [W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1} \cdot sterad^{-1}] = -I_v$$

conjonctions, opposition



écliptique : le plan de l'orbite terrestre

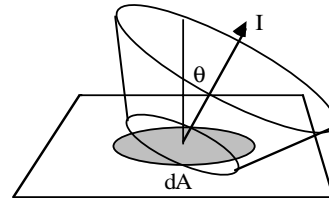
émittance E_v

flux dF_v émis dans toutes les directions du demi espace (c'est à dire dans l'angle solide 2π) par une aire dA de la surface de la source

intensité I_v

flux dF_v passant par une aire dA selon une direction déterminée autour d'un angle solide élémentaire dΩ

$$I_v = dF_v / d\Omega \quad [W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1} \cdot sterad^{-1}] = -B_v$$



pour un rayonnement isotropique, traversant une surface dA :

$$F = \pi I$$

$$= I \int \cos\theta \, d\omega = I \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\phi=0}^{2\pi} \cos\theta \sin\theta \, d\theta d\phi$$

(dω=sinθdθdφ en coord sphériques)

flux F_v

puissance (flux énergétique) qui traverse sous forme de lumière de fréquence ν une surface élémentaire dA [W m⁻² Hz⁻¹]

$$F = \frac{dE}{dt dA} \quad [W/m^2]$$

Magnitude apparente

magnitudes apparentes m₁, m₂ d'étoiles avec flux lumineux f₁ et f₂

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log (f_1 / f_2) \quad \text{ou}$$

$$f_1 / f_2 = 10^{-0.4(m_1 - m_2)}$$

l'augmentation de la luminosité d'un facteur 10 correspond à une soustraction de 2.5 magnitudes

le flux lumineux f est lié à la magnitude apparente m par

$$f \approx 2 \cdot 10^{-8} \cdot 2.5^{-m} \quad [Wm^{-2}]$$

Magnitude absolue

définition : magnitude apparente qu'aurait une étoile s'il était situé à 10 pc

$$m - M = 5 \log (r) + A(r)$$

ou A est une estimation de l'extinction interstellaire

module de distance	m-M	-5	0	5	10	25
r [pc]		1	10	100	1 kpc	1 Mpc

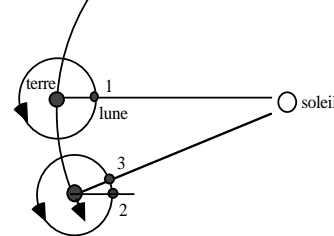
mois sidéral

durée de la révolution lunaire par rapport aux étoiles (de point 1 -> 2)

mois synodique

durée de la révolution lunaire par rapport au Soleil (de point 1 -> 3)

$$1 / \text{mois sider} - 1 / \text{année sider} = 1 / \text{mois synodique}$$



parallaxe

angle sous lequel un objet est observé au-dessus d'une base d'une certaine longueur (triangulation)

- parallaxe de la Lune (base = rayon de la Terre) : 57''
- parallaxe du Soleil (base = rayon de la Terre) : 8.8''

parallaxe annuelle

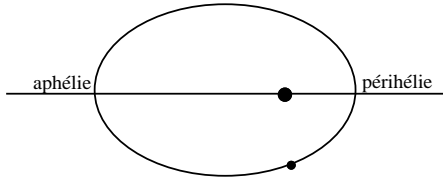
parallaxe d'un objet (étoile) par rapport à la base égale à l'unité astronomique

parsec (pc)

la distance d'une étoile fictive dont la parallaxe annuelle serait d'une seconde d'arc

$$1 \text{ pc} = 360 \cdot 60 \cdot 60 / 2\pi [\text{ua}] = 206265 \text{ ua}$$

périhélie, aphélie :



obliquité

l'inclinaison de l'équateur d'une planète sur le plan de son orbite

pression d'un gaz

un gaz est enfermé dans une "boite" de dimension $\Delta x \Delta y \Delta z$

$$P_{\text{gaz}} = \frac{\text{Force}}{A} = \frac{\Sigma \Delta p_x / \Delta t}{A}$$

$$= \frac{\Sigma \Delta p_x \Delta v_x}{\Delta x \Delta y \Delta z} \quad \text{avec } \Delta v_x = \Delta x / \Delta t$$

l'impulsion d'une particule qui frappe contre A change de

$$\Delta p_x = 2p_x,$$

la particule retourne après $\Delta t = 2\Delta x / v_x \Rightarrow \Delta v_x = v_x / 2$ donc :

$$\Delta p_x \Delta v_x = p_x v_x$$

$$P_{\text{gaz}} = \frac{N \langle p_x v_x \rangle}{dV} = \frac{Nm \langle v_x^2 \rangle}{dV}$$

comme les vitesses sont distribuées de façon isotropique :

$$\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle$$

$$\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle = 3 \langle v_x^2 \rangle$$

$$P_{\text{gaz}} = \frac{Nm \langle v^2 \rangle}{3dV}$$

les molécules du gaz ont une énergie cinétique $mv^2/2$, énergie cinétique totale $dE_{\text{th}} = 1/2 Nm \langle v^2 \rangle$

$$P_{\text{gaz}} = \frac{2}{3} \frac{dE_{\text{th}}}{dV}$$

pression de radiation : si on remplace les particules du gaz (voir pression d'un gaz) par des photons, leur énergie est de mc^2 , et l'énergie cinétique totale $dE_{\text{rad}} = Nm c^2$

$$P_{\text{rad}} = \frac{1}{3} \frac{dE_{\text{rad}}}{dV}$$

$$= \frac{1}{3} U(T)$$

la densité énergétique totale U est égale à dE/dV . Cette quantité est déduite ci-dessous : à la fréquence ν , le rayonnement d'intensité I_ν , provenant d'un angle solide $d\omega$ perpendiculaire à la surface dA produit une énergie dE dans le volume $dV (=cdt \cdot dA)$ qui est

$$dE_\nu = I_\nu d\omega dA dt = I_\nu d\omega dV 1/c$$

densité énergétique provenant d'un angle solide $d\omega$

$$dU_\nu = \frac{dE_\nu}{dV} = \frac{1}{c} I_\nu d\omega$$

la densité énergétique U_ν du rayonnement à la fréquence ν

$$U_\nu = \int_\Omega dU_\nu d\omega = \frac{1}{c} \int_\Omega I_\nu d\omega = \frac{4\pi}{c} I_\nu$$

$$= \frac{4}{c} F_\nu$$

la densité énergétique totale U du rayonnement devient :

$$U(T) = \int_0^\infty U_\nu d\nu = 4\sigma T^4 / c$$

$$= aT^4 \quad (a=4\sigma/c)$$

la pression de radiation peut donc être écrite :

$$P_{\text{rad}} = \frac{1}{3} \frac{dE_{\text{rad}}}{dV} = \frac{1}{3} U(T) = \frac{a}{3} T^4$$

révolution synodique

La période de révolution synodique est le temps qui sépare deux configurations identiques successives du système planète-Soleil-Terre, par exemple deux oppositions.

unité astronomique

la distance moyenne Soleil-Terre $1 \text{ ua} = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$

9.3 CONSTANTES

constantes fondamentales

constante de Planck	h	: $6.63 \cdot 10^{-34}$ J·s
constante de Stefan	σ	: $5.67 \cdot 10^{-8}$ W·m ⁻² ·K ⁻⁴
constante de Boltzmann	k	: $1.38 \cdot 10^{-23}$ J·K ⁻¹
vitesse de la lumière (vide)	c	: $2.99 \cdot 10^8$ m·s ⁻¹
constante de Rydberg	R_∞	: $10^7 973 731$ m ⁻¹
permittivité du vide	ϵ_0	: $8.85 \cdot 10^{-12}$ A·s·V ⁻¹ ·m ⁻¹
perméabilité du vide	μ_0	: $1.26 \cdot 10^{-6}$ V·s·A ⁻¹ ·m ⁻¹
constante de gravitation	G	: $6.67 \cdot 10^{-11}$ m ³ ·kg ⁻¹ ·s ⁻²
charge élémentaire	e	: $1.60 \cdot 10^{-19}$ C
rayon de Bohr	a₀	: $0.529 \cdot 10^{-10}$ m
constante d'Avogadro	L	: $6.02 \cdot 10^{23}$ mol ⁻¹
constante de Wien ($\lambda_{\max}=b/T$)	b	: $2.89 \cdot 10^{-3}$ mK
unité de masse atomique (uma)	u	: $1.66 \cdot 10^{-27}$ kg
rap. masse proton/électron	m_p/m_e	: 1836.15

constantes astrophysiques

rayon du soleil	r_o	: $6.95 \cdot 10^8$ m
masse du soleil	M_o	: $1.99 \cdot 10^{30}$ kg
période de rotation du soleil	τ_0	: 25 jours (à l'équateur)
température, surface du soleil	T_o	: 5850 °K
densité moyenne du soleil	δ_0	: 1.41 g/cm ³
magnitude absolue du soleil	M_{ov}	: +4.83
magnitude apparente du soleil	m_{ov}	: -26.74
constante solaire	S_o	: 1.368 kW/m ²
luminosité du soleil	L_o	: $3.83 \cdot 10^{26}$ W
masse de la Galaxie	m_G	: $1.8 \cdot 10^{11}$ M _o
diamètre de la Galaxie	d_G	: 23 kpc
distance : soleil - centre gal.	r_{SCG}	: 8.7 ± 0.6 kpc
âge de la Galaxie	A_G	: $1.2 \cdot 10^{10}$ ans
période de rotation, Galaxie	τ_G	: $2.5 \cdot 10^8$ ans
magnitude absolue, Galaxie	M_{Gv}	: -20.5
luminosité de la Galaxie		
radio	L_{Gr}	: $3 \cdot 10^{31}$ W
infrarouge	L_{Gir}	: $3 \cdot 10^{34}$ W
optique	L_{Go}	: $3 \cdot 10^{36}$ W
rayons X	L_{Gx}	: $10^{32} - 10^{33}$ W
gamma	L_{Gg}	: $5 \cdot 10^{31}$ W (E γ > 100 MeV)

conversions

distances	1 ua =	$1.49 \cdot 10^{11}$ m
	1 al =	$9.46 \cdot 10^{15}$ m
	1 pc =	$3.09 \cdot 10^{16}$ m
énergies	1 cal =	4.18 J
	1 erg =	10^{-7} J
	1 keV =	$1.60 \cdot 10^{-16}$ J
énergie - longueur d'onde	1 keV :	hc/E = $12.39 \cdot 10^{-10}$ m
énergie - température	1 keV :	E/k = $11.60 \cdot 10^6$ K
masse - énergie	1 uma :	Mc ² = 931.49 MeV