

Les trous noirs : de l'astrophysique à la physique théorique et au-delà

Loïc Villain

Laboratoire de Mathématiques et Physique Théorique (LMPT), Université de Tours
loic@lmpt.univ-tours.fr

Centre Galois

Trous noirs

Êtres mythologiques

- ▶ nom accrocheur (inventé vers 1967)
- ▶ vedettes de la SF
- ▶ **effrayants et captivants** : aspirateurs de l'Univers ? le Soleil peut-il devenir un trou noir ? que se passe-t-il si on tombe dedans ?

Objets astrophysiques « ordinaires »

- ▶ inévitable destin des **étoiles les plus massives**
- ▶ présents au **cœur des galaxies**
- ▶ « **observés** » depuis quelques décennies

Laboratoires pour la physique théorique

- ▶ les comprendre implique maîtriser quasiment tous les domaines de la physique et en particulier la **nature de l'espace-temps**
- ▶ au cœur de la **physique des hautes énergies** moderne

Avertissement (Richard Feynman, Nobel de physique 1965)

« ce que je vous raconte là, c'est une espèce de saga conventionnelle que les physiciens racontent à leurs étudiants, lesquels à leur tour la racontent à leurs étudiants, et ainsi de suite. Ça n'a pas forcément grand-chose à voir avec le développement historique réel de la physique... que j'ignore évidemment ! »

- brève histoire **approximative** de certains concepts physiques et de leur **modélisation**
- la physique est une **science expérimentale** qui s'exprime dans la langue mathématique et utilise les outils mathématiques

Plan

Gravitation et lumière en physique newtonienne

Électromagnétisme et relativités

Trous noirs classiques

Trous noirs quantiques

Conclusion

I

Gravitation et lumière en physique newtonienne : la pré-histoire des trous noirs



Rubrique à Brac © Gotlib - Dargaud

I

A : Dynamique newtonienne et gravitation



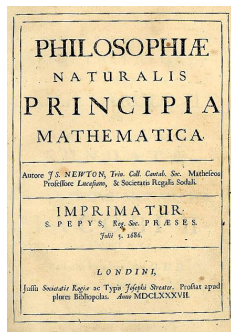
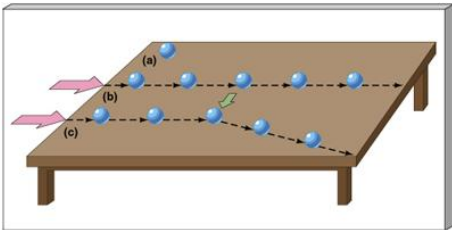
Newton et la dynamique : les Principia

Sir Isaac Newton (1642 – 1727)

Père de la **dynamique** (étude des **causes du changement** dans le mouvement des corps), nombreuses contributions importantes à divers domaines, premier physicien moderne → étudie le mouvement de **corpuscules**

Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (1686) :

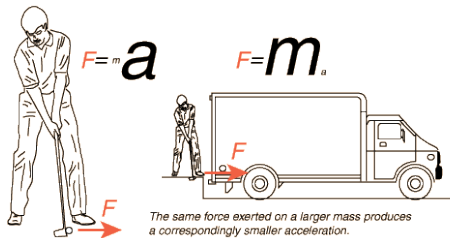
- [1] **Principe d'inertie** : tout corps reste au repos ou bouge à **vitesse constante** le long d'une trajectoire rectiligne, à moins qu'une **force** n'agisse sur lui.



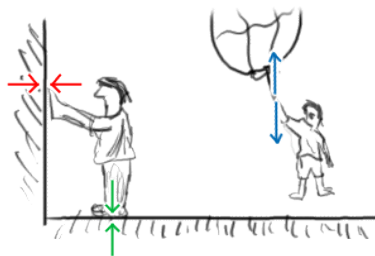
Principe fondamental de la dynamique

Lois de la dynamique :

[2] **Force** = **masse** × **Accélération**



La même force exercée peut résulter en des accélérations très différentes selon la **masse**



[3] **Principe d'action/réaction**

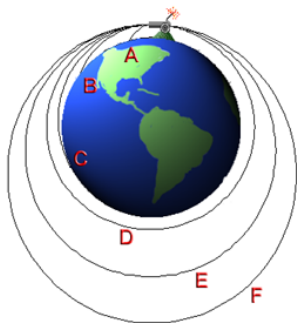
Gravitation universelle

Gravitation dans les Principia

- ▶ force gravitationnelle universelle entre masses
- ▶ même action de la Terre sur une pomme ou sur la Lune

Gravitation avant Newton

- ▶ séparation de nature entre mondes sublunaire et céleste
- ▶ lois de Kepler : description globale du mouvement des planètes



Tests et conséquences de la loi

- ▶ **explications** : lois de Kepler, phénomène des marées, etc.
- ▶ **prédictions** : forme de la Terre, retour de la comète de Halley, Neptune, etc.

I

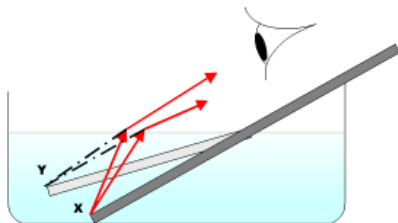
B : Lumière classique



Optique avant Newton

- ▶ **Nature de la lumière ?**
- ▶ **Grèce antique** : rayon éclairant envoyé par l'œil ou information émise par l'objet lumineux ?
- ▶ Vers 980-1030, **Alhazem** et **Ibn Sahl** (Perses, Irak actuel), puis **Snell** (1621) et **Descartes** (1637) : **réflexion** et **réfraction**
→ modélisation par des **rayons lumineux**
- ▶ **origine des différentes couleurs ?**

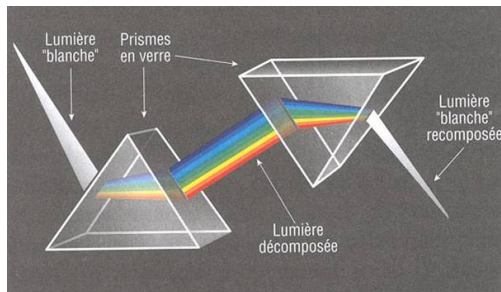
Illustration de la réfraction : changement de milieu → déviation



Newton et l'optique

1669 : lumière blanche composée → notion de **spectre**

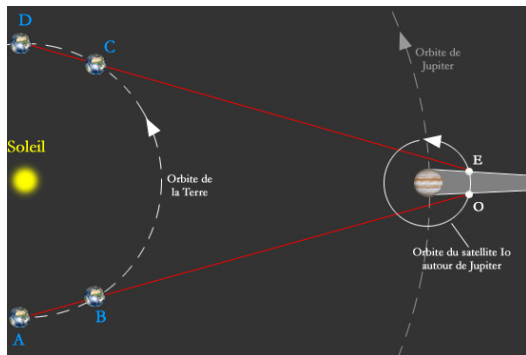
- modélisation **corpusculaire**
- couleur différente $\leftrightarrow$ particules de **vitesse** différente
- réfraction due à une « **force réfringente** » qui agit près de la surface



Modèle(s) de Newton de l'optique → la lumière se comporte « comme » les objets matériels mais **vitesse élevée**

La vitesse de la lumière

- ▶ longtemps **supposée infinie**
- ▶ **Galilée** : essai à l'aide de lanternes distantes → échec
- ▶ **1610, Galilée** : découverte des lunes de Jupiter dont Io
- ▶ **1676, Rømer** : décalage dans le mouvement d'Io

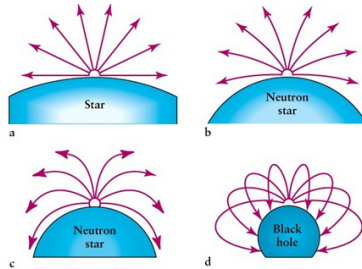


L'avance ou le retard dans le mouvement d'Io sont dûs au temps que met la lumière à nous parvenir

→ **première détermination de la vitesse de la lumière $\sim 300\,000$ km/s**

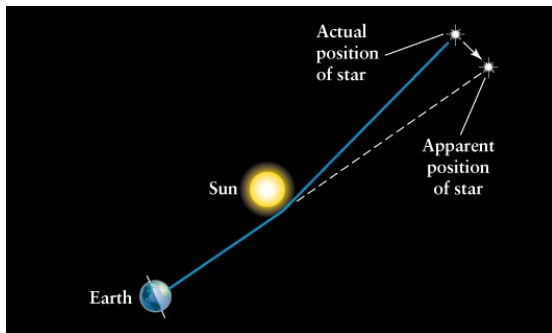
I

C : Lumière et gravitation



Déviation et ralentissement de la lumière

- ▶ **1783, Michell** : **action de la gravitation** sur les corpuscules de lumière
→ **ralentissement** des corpuscules de lumière émis
- ▶ **1786, Blair** : influence de la **vitesse de la source** aussi (cf. Doppler-Fizeau)
→ effet attendu lors de la réfraction (indice optique dépend de c)
- ▶ **1801, von Soldner** :
lumière déviée par champ de gravitation
- ▶ rayons lumineux proches du Soleil « réfractés »
- ▶ **effet faible**, notable uniquement si étoile proche du Soleil → sans intérêt ?

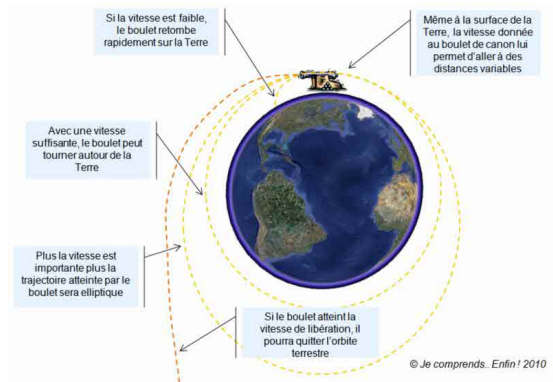


Vitesse de libération et astres obscurs

$$v_{\text{lib}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

v_{lib} augmente si M augmente ou R diminue

- **1783, Michell** : astres tels que $v_{\text{lib}} > c$
 → invisibles mais effet gravitationnel observable si autre astre proche
- situation suffisante : même densité que le Soleil mais diamètre 500 fois plus grand (**Michell, 1783**)



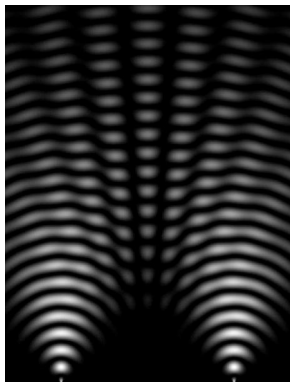
I

D : Optique ondulatoire et électromagnétisme

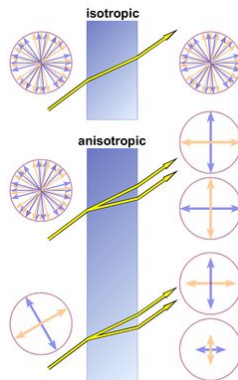


Limitations de l'optique corpusculaire

- ▶ **optique corpusculaire imparfaite** pour expliquer biréfringence et interférences
- ▶ **1678-1690, Huygens** : **modèle ondulatoire**



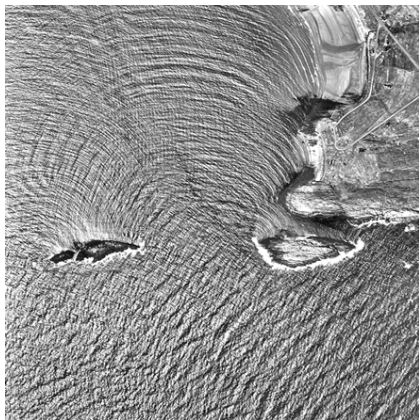
Interférences



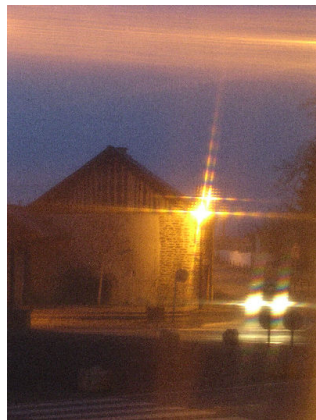
Biréfringence : dédoublement d'un rayon lumineux au travers de certains cristaux

Optique ondulatoire : progrès et oublis...

- ▶ **optique ondulatoire** rencontre de **grands succès** (explique aussi diffraction) : **Fresnel, Young**, etc.
- ▶ **optique corpusculaire oubliée** et avec elle les travaux de Michell, Blair et autres pendant plus de 100 ans...



Loïc Villain (LMPT)

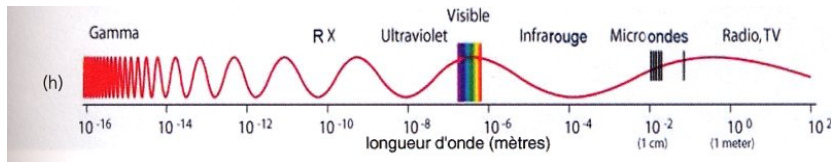
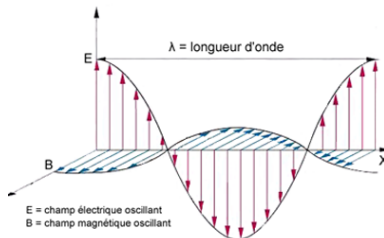


Trous noirs

Électromagnétisme et lumière : Maxwell

1864, Maxwell : théorie de l'**électromagnétisme** (électricité et magnétisme)

→ la **lumière visible** = onde électromagnétique parmi d'autres !



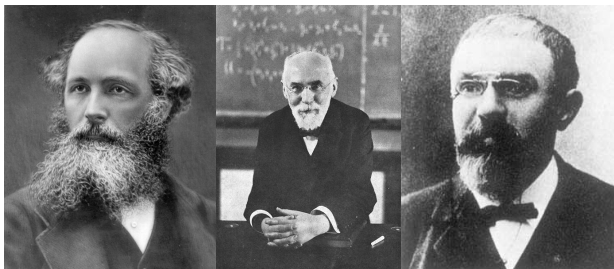
II

Électromagnétisme et relativités



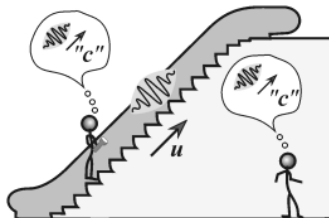
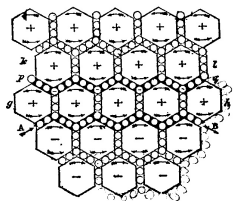
II

A : Maxwell, Lorentz et Poincaré : la physique de l'éther



Propagation de la lumière et éther

- ▶ théorie de Maxwell → ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse c
- ▶ perturbations de l'« éther » (milieu mécanique)
→ référentiel privilégié
- ▶ formule d'addition des vitesses prédit possibilité de mesurer la vitesse de la Terre par rapport à l'éther : $V_{Lum/Terre} = c \pm V_{Terre/Ether}$
→ échec de plusieurs expériences dont celle de **Michelson & Morley (1887)**

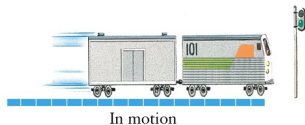
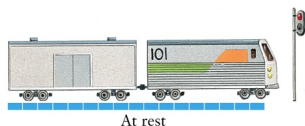


pas d'effet visible → $c \pm V_{Terre/Ether} = c$ même quand $V_{Terre/Ether}$ change!!!
la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs

Lorentz et Poincaré

- ▶ **Lorentz** garde la **physique newtonienne** (ancienne et en accord avec les expériences) et modifie un peu la **théorie de Maxwell** (plus récente et moins bien comprise) pour expliquer les résultats expérimentaux
- ▶ **hypothèses obscures nécessaires** juste pour expliquer l'**absence de variations mesurables de c** : **Poincaré** parle de « **complot de la Nature** »

Contraction et dilatation



a Length contraction

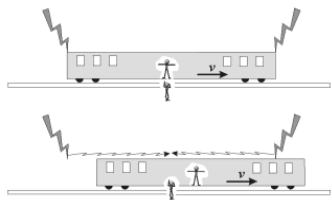
- ▶ **contraction des longueurs**
→ explication de certains résultats expérimentaux, mais pas tous
- ▶ besoin de supposer un « **temps local** » !
- ▶ **explication** : problème de **synchronisation** des horloges en mouvement par rapport à l'éther
→ **variable t' non physique (?)** mais « **vrai temps t** » inobservable en général

II

B : Einstein, Minkowski et la relativité restreinte

Remarque d'Einstein sur la notion de simultanéité (1905)

Simultanéité pas absolue ! notion **relative** liée à l'outil d'observation/de communication



pas de temps absolu :

→ peut-être **Newton** est coupable dans l'incompatibilité apparente avec **Maxwell**

Premier article sur la relativité restreinte (1905)

- ▶ pas de notion absolue de simultanéité
 - ▶ convention reposant sur un protocole expérimental → pas de temps absolu
 - ▶ **tous les observateurs inertiels** : même vitesse pour la lumière et mêmes résultats pour les expériences électromagnétiques
- invariance observée de c compatible avec le principe de relativité

Principe de relativité selon Einstein (1905)

- Idée : application du principe de relativité à **toutes les lois de la physique, pas seulement la mécanique** ($\neq$ Galilée)
 - **Principe de relativité selon Einstein** : deux observateurs en **mouvement à vitesse constante** l'un par rapport à l'autre obtiendront les mêmes résultats pour toutes les expériences **physiques** qu'ils peuvent faire

L'espace et le temps sont des concepts relatifs

le principe de relativité appliqué à l'électromagnétisme et à la mécanique ainsi que **l'abandon des hypothèses d'un temps et d'un espace absolus** conduisent aux **mêmes prédictions que la théorie de Lorentz** (contraction des longueurs, dilatation des durées) mais **sans étranges hypothèses électromagnétiques** :
le principe de relativité est l'ingrédient clef.

Conséquences directes du principe de relativité (1905)



Contraction des longueurs de Lorentz-Fitzgerald et dilatation temporelle symétriques !

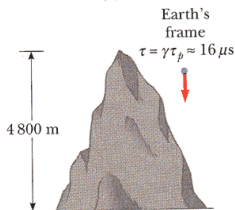
Il n'y a pas d'éther

- ▶ l'hypothèse d'un **éther n'est plus utile**
- ▶ pas de mouvement de la Terre par rapport à l'éther observé car **pas d'éther !**
- ▶ explication de l'universalité de l'**aberration** stellaire (**Bradley, 1730**)

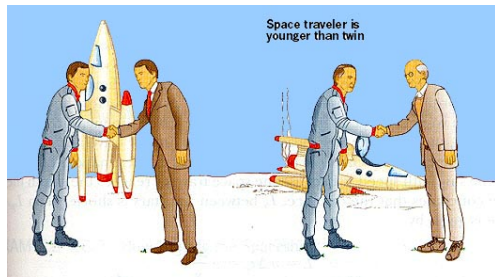
Vérifications expérimentales



(a)



(b)



Dilatation temporelle

- ▶ collisionneurs de particules, astrophysique des hautes énergies, rayons cosmiques, etc.
- ▶ **horloges atomiques** autour de la Terre (**Hafele & Keating, 1971**)
(cf. paradoxe des jumeaux : **pas de symétrie car accélération pour demi-tour**)

Autres conséquences et bilan de la relativité selon Einstein

Situation en 1908

- ▶ équations newtoniennes modifiées
- ▶ la masse est une forme prise par l'énergie : $E = mc^2$
seule l'énergie est conservée, pas la masse
→ particules de masse nulle, création de paires, annihilation, etc.
- ▶ impossible d'atteindre ou dépasser la vitesse c
composition des vitesses : $V \neq u + v$ mais

$$V = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}}$$

si u ou $v = c \rightarrow V = c$

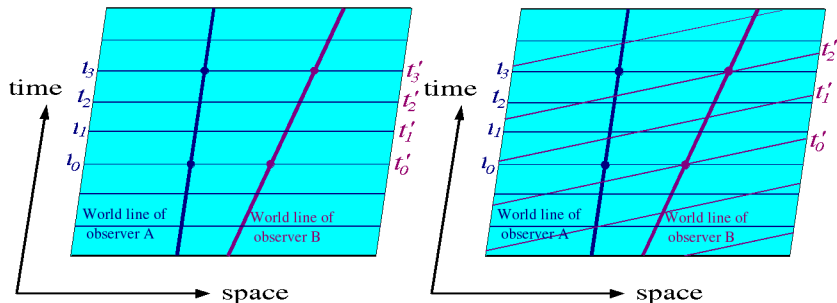
théorie reposant sur des hypothèses simples, mais en « pratique » pas très intuitive et équations compliquées...

La naissance de l'espace-temps

Minkowski (1908)

- ▶ relativité restreinte plus simple et condensée **géométriquement** → ingrédient clef : l'« **espace-temps** » à **4 dimensions**
- ▶ points de l'espace-temps = événements (quelque part à un instant donné)
- ▶ espace-temps est **identique** pour tous les observateurs et n'est pas affecté par eux : « **objet** » absolu
- ▶ relativité de la simultanéité $\leftrightarrow$ **relativité dans le découpage de l'espace-temps en tranches spatiales (= en moments présents)**
- ▶ **contraction et dilatation** de Lorentz $\equiv$ effets de **parallaxe spatio-temporelle**
- ▶ « **vitesse de la lumière** » = « **constante géométrique** » → vitesse maximale pour l'information et **vitesse de toute particule sans masse (pas uniquement la lumière)**

Observateurs inertiels et diagramme d'espace-temps



Gauche : observateurs **inertiels** dans l'espace-temps selon **Newton** : tous ont le **même temps** et le **même espace** ;

Droite : pour **Minkowski**, l'**espace** (= ensemble des événements simultanés) **dépend de l'observateur**.

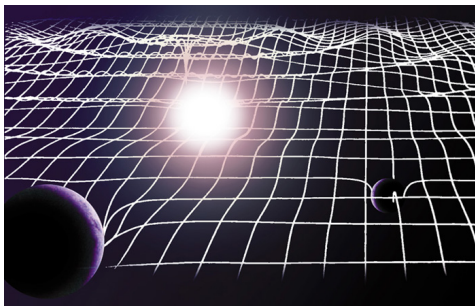
Questions ouvertes en relativité restreinte

Problèmes et questions

- ▶ Pourquoi seuls les **observateurs inertiels** ont le droit au **principe de relativité** ?
→ certaines personnes sont « **moins relatives** » que les autres ?
- ▶ Qu'en est-il de la **gravitation** selon Newton si aucune **information** ne peut voyager **plus vite que c** ?

II

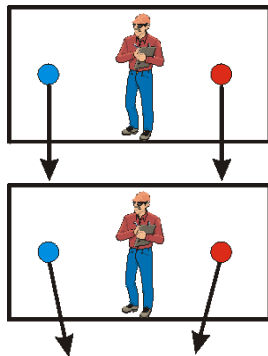
C : Relativité générale et espace-temps courbe



Principe d'équivalence selon Einstein



Égalité des masses inertielles et gravitationnelles → impossible de faire localement la différence entre un champ de gravitation et une accélération
→ principe d'équivalence



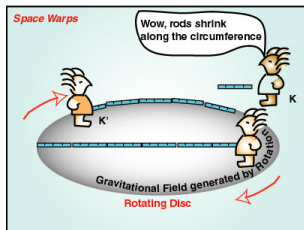
En haut : accélération uniforme

En bas : un champ gravitationnel n'est pas homogène :

→ déviations liées à des effets de marée

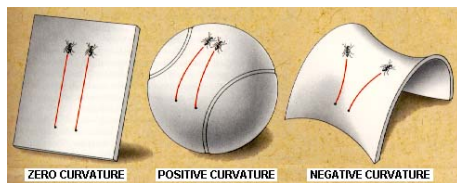
→ le principe d'équivalence est local

Accélérations, gravitation et géométrie



- ▶ Principe d'équivalence → la même chose doit avoir lieu en présence d'un champ de gravitation
 - les effets de marées sont une illustration de cette courbure

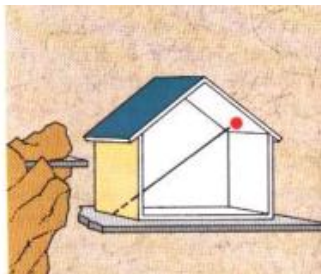
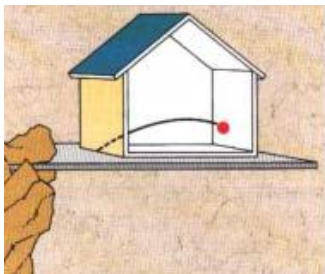
- ▶ Disque en rotation : contraction de Lorentz (pas pour le rayon)
- Circonférence $< 2\pi \times$ Rayon
- la géométrie euclidienne n'est plus valable ! : l'espace est « courbe »



Formulation de Minkowski de la RR

→ gravitation = signe de la courbure de l'espace-temps

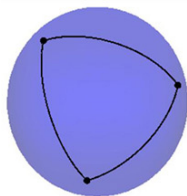
Référentiels inertiels



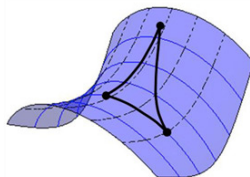
- Égalité des masses inertielles et gravitationnelles → une balle suit une **trajectoire rectiligne uniforme** pour un **observateur en chute libre**
 - l'observateur ne mesure pas de force gravitationnelle locale
 - il/elle peut se croire **inertiel(le)**
 - le mouvement rectiligne uniforme est celui que l'on attend selon le **principe d'inertie**
 - **La force gravitationnelle, ressentie quand on est accélérée par rapport à la chute libre n'est peut-être qu'une pseudo-force d'inertie...**

Principe de relativité généralisé

- ▶ le principe de relativité est valable pour **tous les observateurs**, mais cela nécessite de compliquer la **géométrie** apparente de l'espace et du temps : ils semblent **courbes** à un observateur accéléré
- ▶ la théorie de Newton doit être modifiée et la nouvelle description explique que la **force de gravitation** traduit la **courbure de l'espace-temps** produite par la **présence de masse et d'énergie**



positively curved space
sphere

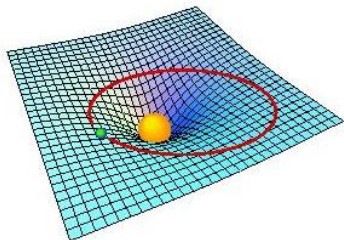


negatively curved space
saddle

Gravitation relativiste

Sources de la courbure

- ▶ équivalence masse/énergie (RR) → l'énergie (et pas seulement la masse) crée la gravitation
- ▶ flots d'énergie quelconques → champ gravitationnel dynamique
 - RG : nécessaire de savoir décrire un espace-temps dynamique quelconque
 - formulation mathématique de cette idée : 8 ans de travail (1907-1915)



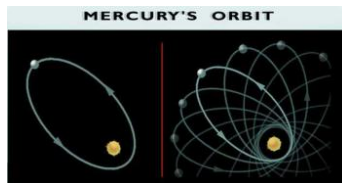
Raison pour laquelle la Terre orbite
autour du Soleil selon la RG

Prédictions et tests directs de la RG

Avance du périhélie de Mercure

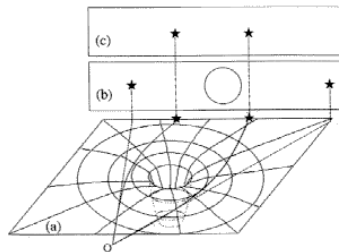
- ▶ le mouvement de Mercure n'était pas parfaitement compris : l'orbite tournait plus vite que prévu par les calculs newtoniens

→ la RG donne le résultat exact



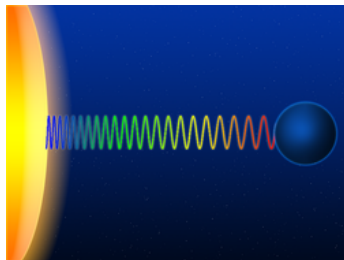
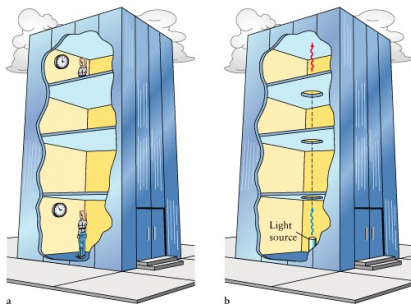
Déviation de la lumière

- ▶ la lumière provenant d'étoiles lointaines et passant à côté du Soleil est déviée
→ plus facile à constater pendant une **éclipse de Soleil**
- ▶ 1919 : **Eddington** vérifia la prédiction d'Einstein (deux fois la valeur trouvée par **von Soldner**)



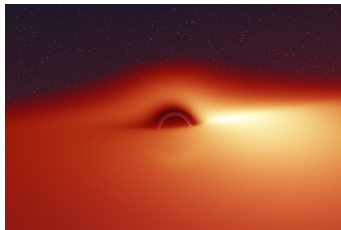
L'effet Einstein et le décalage vers le rouge

- ▶ influence d'un champ de gravitation sur le temps : **crucial pour le GPS**
- ▶ une onde émise avec une **certaine fréquence** dans un **champ de gravitation intense aura une fréquence plus faible** là où le champ est moins intense
→ **décalage vers le rouge gravitationnel** ($\neq$ effet Doppler qui est lié à un **mouvement relatif**)
- ▶ vérifié même dans le champ de gravitation terrestre et sur une distance de 22 mètres (1960, Pound et Rebka, **différence relative en fréquence de $1/10^{15}$**)



III

Trous noirs classiques



III

A : Schwarzschild et les étoiles compactes



Solution de Schwarzschild et singularité

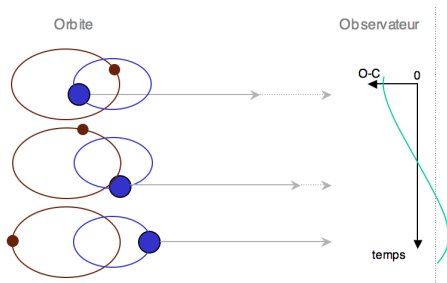
- ▶ 1916, Karl Schwarzschild : première **solution** des équations d'Einstein
→ espace-temps autour d'une **masse sphérique**
- ▶ champ gravitationnel ne dépend que de la **distance à la masse pas de la structure interne du corps sphérique**
- ▶ pour une **masse M donnée**, un terme infini (= une **singularité**) apparaît dans la solution mathématique si le rayon R est plus petit que le « **rayon de Schwarzschild** »

$$R_S = \frac{2 G M}{c^2}$$

- ▶ R_S = rayon telle que $v_{\text{lib}} = c$!
- ▶ longs débats pour décider du **sens physique** à donner à ce phénomène et juger de sa réalité...
- ▶ dans un premier temps, semble **peu intéressant** :
 $R_S \approx \frac{M}{M_\odot} \times 2950 \text{ m}$ → très différent des étoiles observées...
- ▶ exemple : **rayon Schwarzschild Terre = 9 mm...**

Premier pas vers les trous noirs : les systèmes binaires

- ▶ 1717, **Halley** : Sirius (étoile proche observée depuis l'Antiquité) a une **trajectoire « oscillante »** → raison initialement inconnue...
- ▶ 1783, **Herschel** : découverte d'un **système binaire** d'étoiles (40 Eridani : en fait système triple !)
- ▶ systèmes binaires : prédiction faite (puis oubliée) par **Mitchell (1767)** de manière **statistique**...
- ▶ **20%** des étoiles visibles à l'œil nu sont en fait des systèmes multiples...

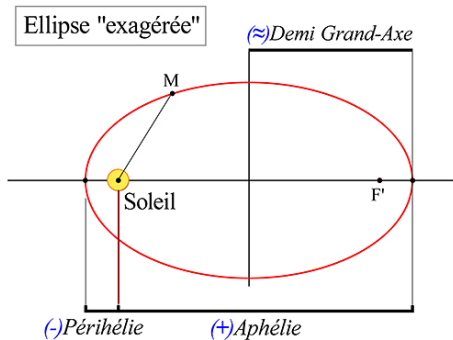


Binaires et lois de Kepler

- mouvement orbitale de binaires :
 moyen de déterminer les masses des
 étoiles grâce à la 3ème loi de
 Kepler :

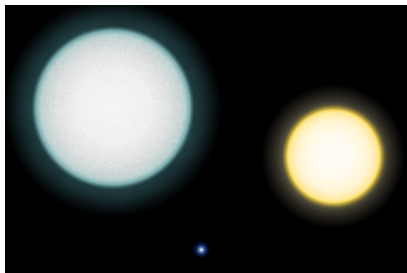
$$P^2 = \frac{4\pi^2}{GM} a^3 ,$$

où a est le « demi grand-axe » de
 l'orbite elliptique



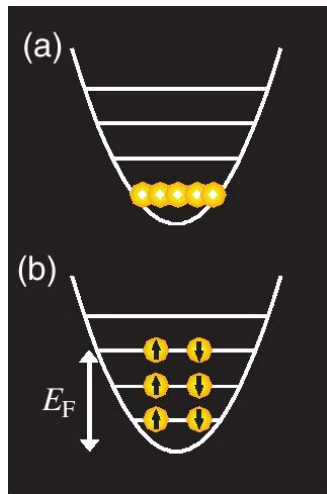
Deuxième pas vers les trous noirs : les naines blanches

- ▶ 1844, **Bessel** : mouvement de Sirius A dû à un **compagnon invisible**
- ▶ 1862 : observation de Sirius B, peu lumineuse
- ▶ 1915 : découverte d'une **température élevée** (= grande émission d'énergie) par **analyse du spectre**
 - **étoile très petite** ($\sim$ Terre)
 - masse volumique $\sim$ **1 tonne par centimètre cube** (1 million de fois celle du Soleil !)



Troisième pas : la compréhension des naines blanches

- ▶ **1924, Eddington** : selon la relativité générale **décalage vers le rouge** de la lumière émise (effet Einstein)
- ▶ **1925, Adams** : vérification
- ▶ **1926, Fowler** : possible d'obtenir de telles masses volumiques grâce à la physique quantique et au **principe d'exclusion de Pauli** (1925)



(a) bosons et (b) fermions à température « faible »

Quatrième pas : supernovæ, pulsars, etc.

- ▶ 1932, **Chadwick** : découverte du **neutron**
- ▶ 1934, **Yukawa** : théorie de la structure des **noyaux atomiques**
- ▶ 1934, **Baade** et **Zwicky** : lien entre **supernovæ** et « **étoiles à neutrons** » ?
- ▶ 1939, **Oppenheimer** et **Snyder** : étude **numérique** de l'**effondrement d'une étoile**
- ▶ 1965, détection de Cygnus X-1 (étoile + source X)
- ▶ 1967, **Bell** et **Hewish** : découverte du premier **pulsar** → **rayon ~ 10 km**
→ **masse volumique ~ 100 millions de tonnes par centimètre cube**



The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORS2)

ISO PR Photo 46/99 (17 November 1999)

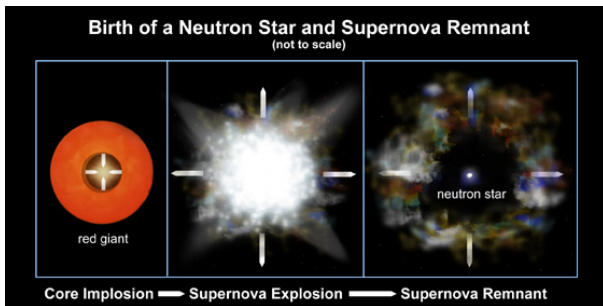
© European Southern Observatory



trous noirs envisagés plus sérieusement comme résultat possible de l'**effondrement d'étoiles massives en fin de vie** → « **âge d'or** » des trous noirs dans les années 1960-1970 (**Hawking, Penrose, Wheeler, Carter, etc.**)

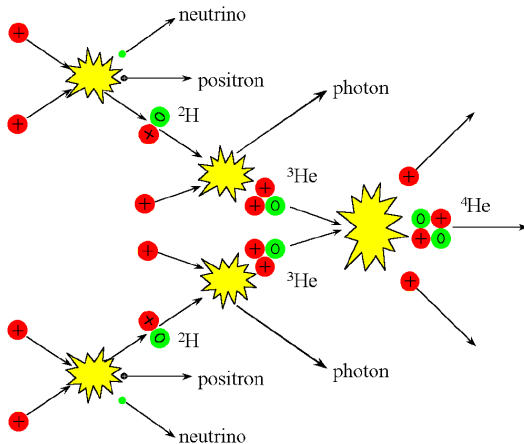
III

B : Résumé d'évolution stellaire et formation des trous noirs



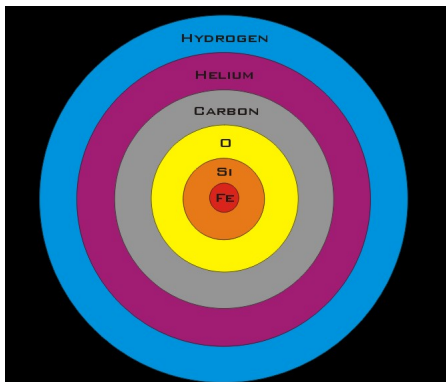
Évolution stellaire et destin des étoiles massives

- ▶ étoiles $\equiv$ **réacteurs nucléaires à fusion** : atomes légers $\rightarrow$ gros noyaux + énergie $\rightarrow$ **pression qui résiste à la gravitation** (effondrement sinon)
- ▶ ici : **fusion** car petits donnent gros ; autre : **fission** avec gros donnent petits



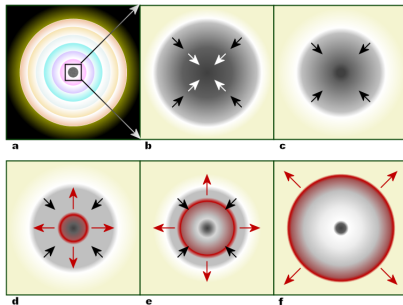
Structure en oignon

- ▶ dans les **étoiles massives**, des **éléments de plus en plus lourds** sont formés
- ▶ les plus lourds vont au **centre** (stratification, comme pour l'eau et l'huile)
- ▶ le plus lourd de tous est le **fer** : il est inerte (**ne peut pas réagir**)



Supernova

- ▶ masse d'un **cœur de fer** trop élevée (~ 1.4 masse solaire)
→ **effondrement** sous son propre poids (**Chandrasekhar** 1930 : on parle de "masse de Chandrasekhar")
 - ▶ le **cœur de fer s'effondre**, le reste suit plus lentement, le cœur se durcit à cause des interactions entre neutrons et protons, il **rebondit** alors que l'extérieur tombe toujours → choc et **expulsion des couches externes**
- **une supernova gravitationnelle**

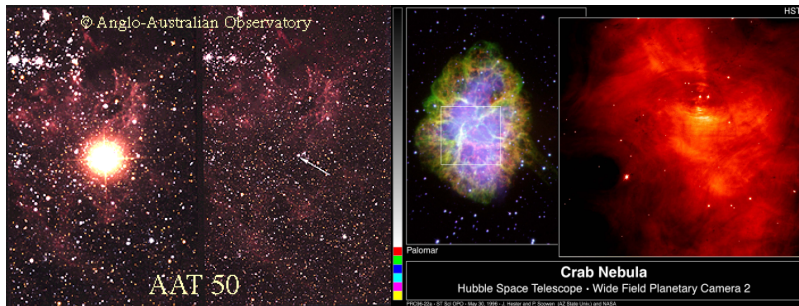


Photos de supernovæ



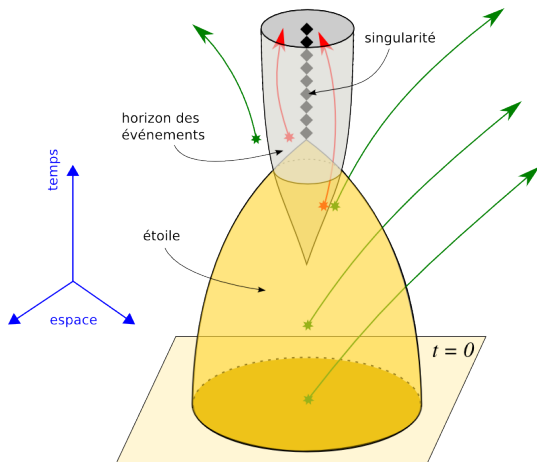
Résidu central

- ▶ résidu central = cœur de fer « brisé » + matière pas expulsée
- ▶ noyaux brisés → plasma chaud et dense de protons, neutrons, électrons et neutrinos
- ▶ soupe très chaude et dense : $T \geq 10$ milliards de degrés ; masse du volume d'une balle de tennis ~ 10 milliards de tonnes (10^{13} kg)
- ▶ rayon initial ~ 100 km → contraction en moins d'une minute, rayon ~ 10 km → étoile à neutrons ou trou noir si trop de masse



Formation d'un horizon et naissance d'un trou noir

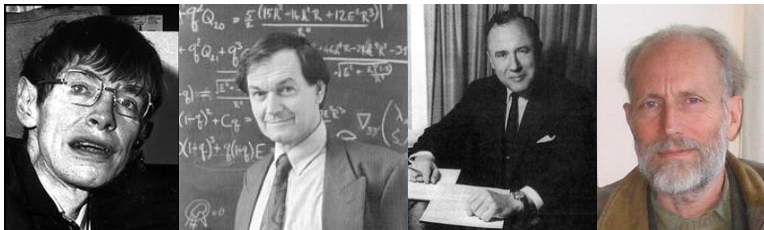
- ▶ formation d'un **horizon** dont même la lumière ne peut sortir
- ▶ effondrement « rapide » vers une **singularité interne**
- ▶ aucune force pour contrer la gravitation



(figure E. Gourgoulhon)

III

C : Trous noirs classiques



Trous noirs

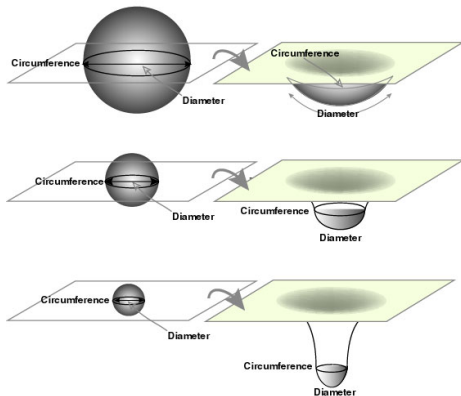
- ▶ trou noir = région de l'espace-temps dont rien ne sort (même la lumière)
 - ▶ frontière = horizon du trou noir ($\text{surface} = 4\pi R_S^2$)
(correspond à la singularité de Schwarzschild)
 - ▶ 1967, **Wheeler** : terme « trou noir »
 - ▶ 1965-1970, **Hawking** et **Penrose** : singularité interne inévitable → besoin d'une description quantique de la gravitation
-
- ▶ espace-temps extrêmement courbe : orbite circulaire pas toujours possible ; sphère de photons ; etc.
 - ▶ invisible mais effet gravitationnel sur objet proche (prédiction Michell)



Horizon : propriétés

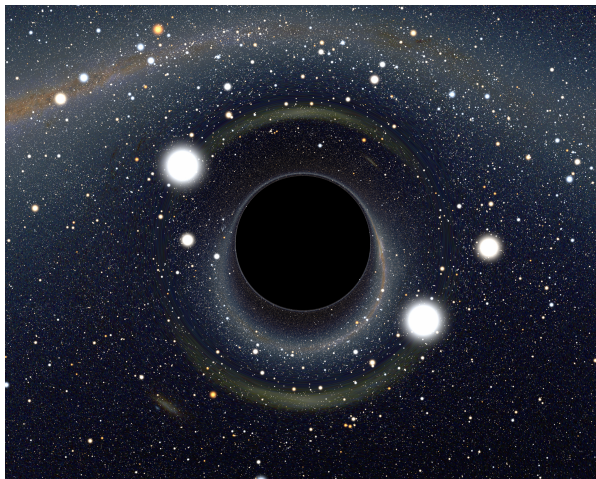
- ▶ pas une surface physique
- ▶ espace-temps **extrêmement courbe** : R_S n'est pas la distance entre le centre du trou noir et l'horizon
- ▶ **accélération infinie** pour rester immobile à cet endroit
- ▶ **décalage vers le rouge infini** par rapport aux observateurs lointains : matière semble gelée / temps arrêté

STARS WITH THE SAME MASS, BUT DIFFERENT SIZES: HOW CURVED?



un observateur lointain ne voit jamais la matière en chute libre vers un trou noir passer l'horizon mais elle devient invisible

Vision de l'horizon



(simulation numérique par A. Riazuelo)

- images multiples possibles → lentille gravitationnelle
- taille apparente augmentée

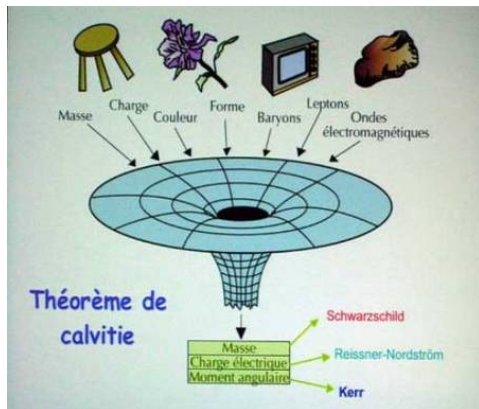
Près et au-delà de l'horizon

- ▶ horizon en dessous même après passage pour observateur en chute libre
- ▶ aucune sensation spéciale pour observateur en chute libre si trou noir suffisamment gros
- ▶ accélération infinie pour rester immobile sur l'horizon → vision déformée et image concentrée de l'Univers
- ▶ effets de marées (diminuent avec masse du trou noir) → entrée dans un trou noir supermassif sans effets notables !
- ▶ à l'intérieur : courbure chaotique de plus en plus importante et destruction inévitable (détails précis inconnus !)
- ▶ en un temps bref, atteinte d'une « région » où espace et temps n'ont plus de sens

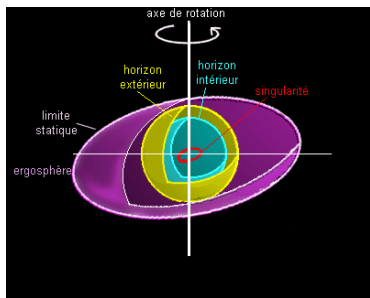


Les trous noirs sont chauves

- ▶ 1918, **Reissner** et **Nordström** : solution avec **charge électrique** (q)
- ▶ 1963, **Kerr** : trou noir en **rotation** (Ω)
- ▶ **Wheeler** : théorème de « calvitie » : trou noir défini par M , Ω et q

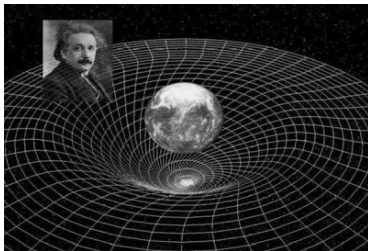


Trous noirs en rotation



- ▶ entraînement des référentiels : effet Lense-Thirring
- ▶ **ergorégion** dans laquelle rien ne peut rester immobile
→ effet sur les disques d'accrétion

- ▶ extérieur : trou noir de Kerr
- ▶ intérieur imprévisible



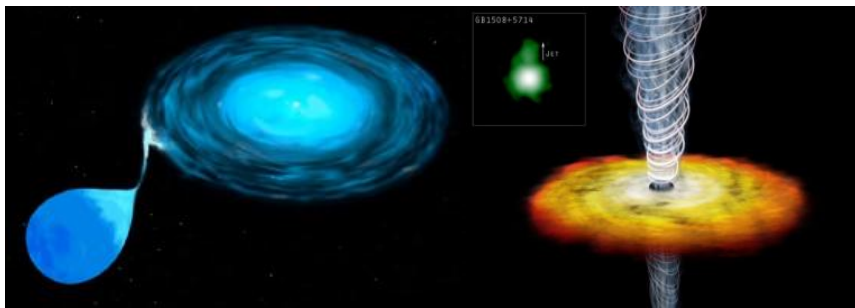
III

D : Trous noirs en astrophysique



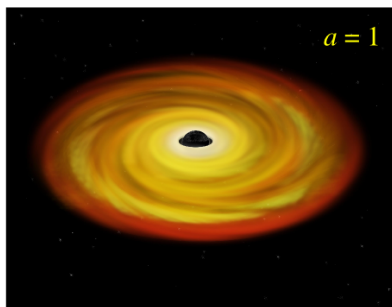
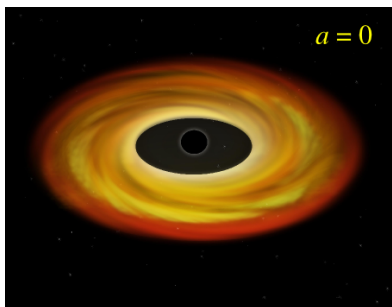
Observation des objets compacts

- ▶ trou noir : pas d'émission directe de lumière, mais matière à proximité
- ▶ souvent localisés dans des **systèmes binaires** → matière arrachée au compagnon → **disque d'accrétion**
→ matière chauffée → émission de **rayons X, ondes radio, etc.**
- ▶ même scénario possible si étoile à neutrons et pas trou noir



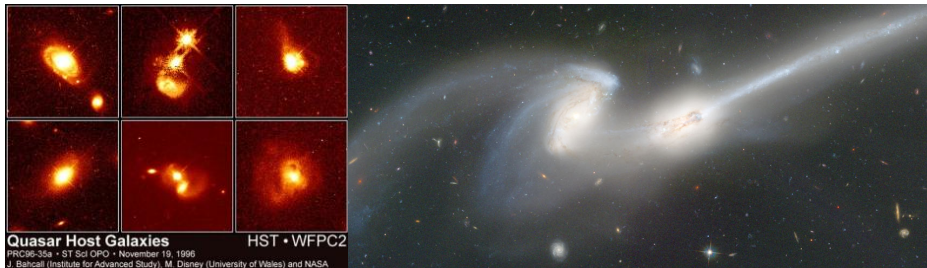
Disques d'accrétions et objets compacts

- ▶ la limite interne traduit la position de l'**orbite circulaire stable la plus proche**
- ▶ position dépend de l'objet central, en particulier s'il est en rotation



Trous noirs supermassifs et quasars

- ▶ idem pour **trous noirs très massifs** : **plusieurs milliards de masses solaires**
 - trou noir supermassif au **centre des galaxies** (même la Voie Lactée)
 - accrétion d'étoiles → observation de **"quasars"** : objets très lointains (distances cosmologiques) avec très forte émissivité mais spectre semblable à celui d'une étoile
- ▶ quasar le plus brillant : **2000 milliards (10^{12}) de fois le Soleil, ~ 100 fois plus qu'une galaxie comme la Voie Lactée**

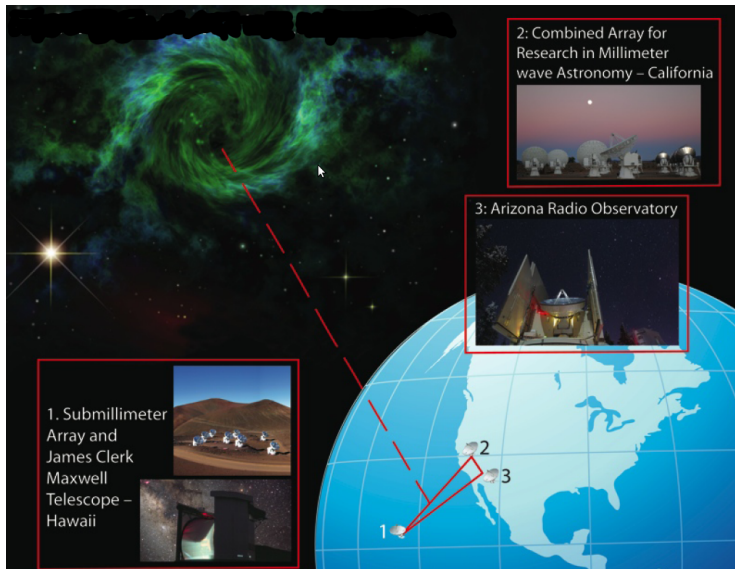


Voir le disque d'accrétion et l'horizon ?

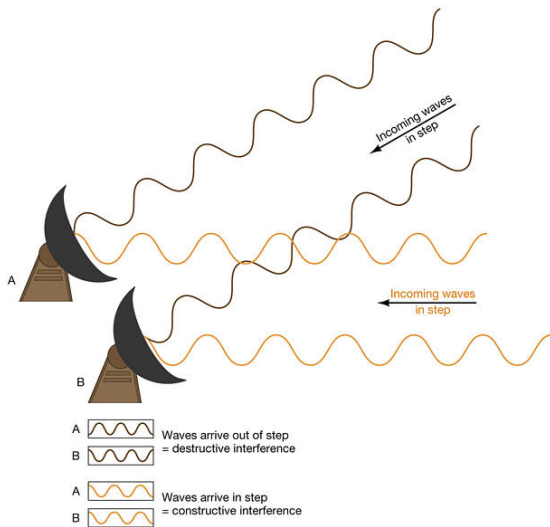
- ▶ **diamètre apparent** de trous noirs supermassifs proches $\sim 50 \mu\text{arcseconde}$;
- ▶ Télescope spatial Hubble : résolution $\sim 10^5 \mu\text{arcseconde}$...

Nom	Masse [$M_{\odot}$]	Spin $a = cJ / (GM^2)$	Distance [10^6 al]	Diamètre apparent [10^{-6} "]
Sgr A*	$4,3 \pm 0,3 \cdot 10^6$	?	0,027	53
M31	$1,6 \pm 0,5 \cdot 10^8$	?	2,5	20
M81	$8 \pm 2 \cdot 10^7$	?	13	2
NGC 4258	$3,78 \pm 0,01 \cdot 10^7$	?	23	0,5
M87	$3,6 \pm 1,0 \cdot 10^9$	?	55	21
MCG-6-30-15	$4 \pm 2 \cdot 10^6$	$0.989 \pm 0,009$	120	0,01

Solution : l'interférométrie à très longue base (VLBI)

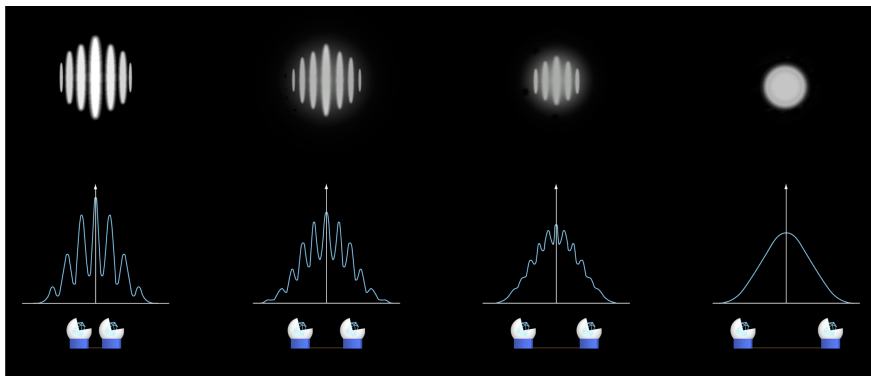


Interférométrie

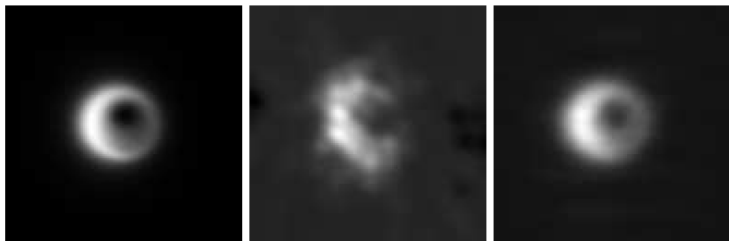


Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Interférométrie pour augmenter la résolution



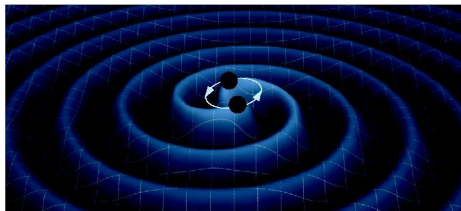
Simulations de possibles observations prochaines...



Simulations numériques d'observations par le Event Horizon Telescope (EHT)

- ▶ à gauche : vision parfaite sans limitation de résolution ;
- ▶ au milieu : avec 7 stations ($\sim 2015 ?$) ;
- ▶ à droite : avec 13 stations ($\sim 2020 ?$).

Binaires et ondes gravitationnelles

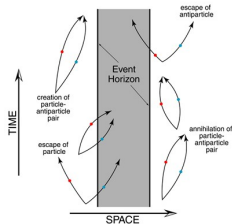


Binaires compactes

- ▶ évolution en émettant des **ondes gravitationnelles**
- ▶ le système perd de l'énergie et les **trous noirs se rapprochent**
- ▶ résultat final : formation d'un unique trou noir
- ▶ ondes gravitationnelles détectables par des **interféromètres** (Photo : VIRGO, à Pise en Italie)

IV

Trous noirs quantiques

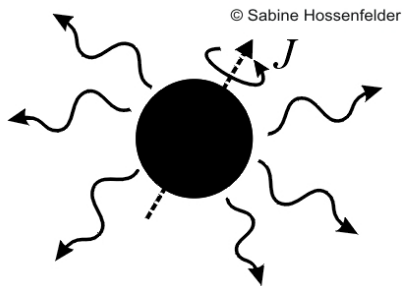


Thermodynamique des trous noirs

- ▶ 1969, **Hawking** : surface de l'horizon ne peut qu'augmenter
- ▶ 1972, **Bekenstein** : lien entre surface de l'horizon et entropie ($\sim$ mesure désordre) ? $\rightarrow$ second principe généralisé
- ▶ 1972, **Carter, Hawking et Bardeen** : thermodynamique des trous noirs (ex. : capacité calorifique négative)
- ▶ 1974, **Hawking** : rayonnement des trous noirs et évaporation (effets quantiques)
 $\rightarrow$ température de Hawking :

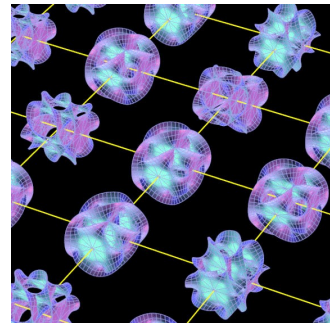
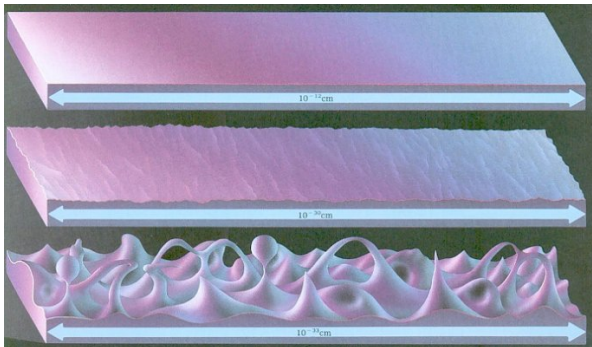
$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_b}$$

$\rightarrow$ négligeable pour trou noir stellaire (ou plus gros) mais pas pour trous noirs microscopiques primordiaux

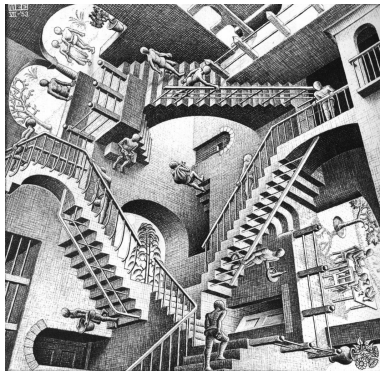


Gravitation quantique et trous noirs

- ▶ Espace-temps aux petites échelles : fluctuations quantiques → **micro-trous blancs** et **trous de ver**
- ▶ théorie quantique de la gravitation : théorie des cordes (spéculative) → **dimensions supplémentaires** ?
- ▶ théorie des cordes → trous noirs = « pelotes de cordes » dans un espace-temps à 11 ou 12 dimensions mais aussi **saturnes noires**
- ▶ production de **micro-trous noirs** dans des collisions de particules (LHC) ?



Conclusion :



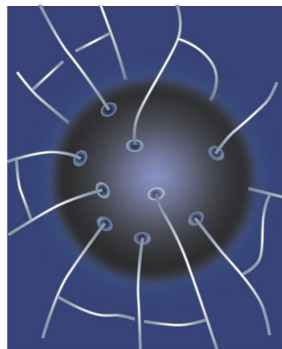
Physique, compréhension du monde et trous noirs

- ▶ **trous noirs** = **prédiction théorique** (Michell, Schwarzschild) ;
- ▶ objets astrophysiques **observés** même si pas pris au sérieux initialement ;
- ▶ sources de questions sur la **nature de l'espace-temps** ;
- ▶ **laboratoires naturels** pour la physique théorique ;
- ▶ illustration de la **puissances prédictive** des mathématiques (Galilée : la Nature parle dans le « langage mathématique »).

Exemples de thèmes de recherche actuels (1)

Physique théorique

- ▶ gravitation quantique et nature de l'espace-temps (cordes mais pas seulement)
- ▶ thermodynamique des trous noirs quantiques
- ▶ trous noirs dans des théories alternatives de la gravitation
- ▶ etc.

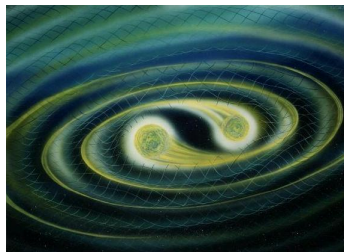


Trou noir selon la gravité quantique à boucles

Exemples de thèmes de recherche actuels (2)

Astrophysique

- ▶ effondrement d'étoiles massives et production de trous noirs
- ▶ observation en infrarouge par interférométrie (centre Voie Lactée)
- ▶ émission d'ondes gravitationnelles
- ▶ mécanismes des quasars
- ▶ rôle des trous noirs supermassifs dans l'apparition des premières galaxies ?
- ▶ etc.



émission d'ondes gravitationnelles par un système binaire compact

Références (1/2)

Livres sur les trous noirs ou la relativité générale :

- [S. Collin-Zahn](#), *Des quasars aux trous noirs*, EDP Sciences (2009)
- [J. Eisenstaedt](#), *Einstein et la relativité générale*, CNRS Éditions (2007)
- [JP. Lasota](#), *La Science des trous noirs*, Odile Jacob (2010)
- [JP. Luminet](#), *Le destin de l'univers : Trous noirs et énergie sombre*, Fayard (2010)
- [K. Thorne](#), *Trous noirs et distorsions du temps*, Flammarion (1997)

Articles ou revues sur les trous noirs :

- [E.ourgoulhon](#), *Trous noirs : à la veille d'une nouvelle ère observationnelle*, L'Astronomie 125 (Nov. 2011)
- [Collectif](#), *Trous noirs : ces objets théoriques deviennent enfin réalité*, Dossier Pour la Science (Avr.-Juin 2012)

Autres livres intéressants :

- [T. Damour](#), *Si Einstein m'était conté*, Le Cherche Midi (2005)
- [J. Eisenstaedt](#), *Avant Einstein*, CNRS Éditions (2005)
- [Feynman](#), *Lumière et matière, une étrange histoire*, Seuil (1999)
- [B. Greene](#), *L'Univers élégant*, Folio Essais, Gallimard (2005)
- [Stannard & Gamow](#), *Le Nouveau Monde de M. Tompkins*, Le Pommier (2007)

Références (2/2)

Sur le web :

- <http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier509-1.php> : dossier sur la relativité restreinte
- <http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier510-1.php> : dossier sur la relativité générale
- <http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier614-1.php> : dossier sur les trous de vers
- <http://www2.iap.fr/users/riazuelo/bh/index.html> : vidéo d'A. Riazuelo (simulation numérique)
- <http://jila.colorado.edu/~ajsh/insidebh/index.html> : site illustrant divers phénomènes autour des trous noirs (plus complet et compliqué ! en anglais)
- à chercher (youtube, etc.) « ce qu'Einstein ne savait pas encore » (3 parties : vidéos accompagnant le livre « l'Univers élégant »)