



La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

La Physique de l'infiniment grand

<http://aaa.guillaumeponce.org/>



La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

Cet exposé est le premier d'une série de trois, destinée à servir d'introduction à la cosmologie en ouverture de saison.

Les ambitions de cette série sont les suivantes :

- Proposer des exposés **abordables**, notamment en vue d'accueillir de nouveaux membres dans l'association et de commencer la saison en douceur ; ou éventuellement pour effectuer des présentations auprès du grand public.
- Poser les **bases générales de la cosmologie**, dans son état de l'art actuelles.
Ces bases pourront ensuite être approfondies dans des exposés moins généraux.



La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

La Taille de l'Univers



Précautions de langage

La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

- « Infiniment » grand est (peut être) un abus de langage.
- La question de la finitude de l'Univers n'est pas résolue (on y reviendra).
- On parle ici d'infiniment grand par opposition à l'infiniment petit, sujet de l'épisode 2 à venir, qui est tout autant un abus de langage.
- « Infiniment grand » et « infiniment petit », ça fait des titres accrocheurs, à défaut d'être totalement pertinents.
- Mais par rapport à nous autres qui sommes « infiniment moyens », l'Univers est **très** grand, même en nous limitant à l'Univers observable.



Grand comment ?

La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

L'Univers selon le modèle cosmologique standard :

- 13,7 milliards d'années d'existence, selon la théorie du Big Bang.
- En expansion.
Cette expansion n'a pas toujours connu la même vitesse. Après avoir connu une très brève période d'inflation extrêmement rapide, elle s'est calmée ; mais depuis elle accélère progressivement.
- Un Univers observable de 45 milliards d'années lumières de rayon (et, du fait de l'expansion, non pas 13,7).

Visionnage de la vidéo de Balade Mentale intitulée Plongée dans l'infiniment grand.

<https://www.youtube.com/watch?v=MuaRMr63Yoc>



Observations

La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

Quand on observe l'Univers à grande échelle, on voit :

- Du « vide », ou plus exactement de l'**espace**.
- De la **matière** (baryonique), pourvue de **masse**, organisée en différents niveaux de structures, de minuscules poussières à de gigantesques galaxies, elles-mêmes organisées en amas, superamas ...
- De la **lumière** (ondes électromagnétiques) émise par toute matière au dessus du zéro absolu.
- On peut en outre faire remarquer que tous ceci s'inscrit dans un écoulement du **temps**, dont la flèche va du passé vers le futur.



La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

La Théorie de la relativité d'Einstein



Avant Einstein 1 : Galilée et la chute des corps

La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

Relativité galiléenne et référentiel inertiel : en l'absence d'accélération, on ne saurait dire si l'on est immobile ou si l'on se déplace à vitesse constante.

Expérience : en voiture ou en avion, vous n'êtes enfoncés dans vos sièges que lorsque vous accélérez. A vitesse constante, même très élevée, le voyage est confortable.

Un référentiel inertiel (ou galiléen) est un référentiel qui est soit immobile, soit mobile à vitesse constante (absence d'accélération).

L'attraction gravitationnelle de la Terre applique la même accélération à tous les corps qui la subissent (fameuse expérience de la tour de Pise).

En bref : **La gravité se manifeste sous la forme d'une accélération.**



Avant Einstein 2 : Kepler et la mécanique céleste

La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

- Dans l'antiquité Grecque, on considérait que la mécanique terrestre et la mécanique céleste étaient régies par des lois complètement différentes.
« Ici bas les choses tombent, là-haut elles se promènent. »
Cette conception s'intègre à la conception ptoléméenne du géocentrisme.
- Trois lois, les deux premières publiées en 1609 et la troisième en 1618, tirées de l'observation des trajectoires des planètes d'un système solaire héliocentrique, mais généralisables à tous les objets célestes.

En bref : **Les corps célestes (suffisamment proches) se tournent les uns autour des autres selon des trajectoires elliptiques, à des vitesses variables, mais calculables.**



Avant Einstein 3 : Newton et la théorie universelle de la gravitation

La Physique de l'infiniment grand

La Taille de l'Univers

La Théorie de la relativité d'Einstein

Des Trous dans la raquette

Conclusion

Unification des deux précédents dans une **théorie universelle de la gravitation**. Les lois énoncées par Newton permettent d'expliquer aussi bien la chute des corps que les mouvements orbitaux des corps célestes, en utilisant les mêmes équations (à quelques imprécisions près, notamment concernant Mercure).

- La gravitation est une **force** qui est générée par tout objet pourvu d'une masse et subie par tout objet pourvu d'une masse.
- La force de gravitation exercée par un objet est proportionnelle à sa masse. Elle diminue avec la distance en raison du carré de cette distance.

En bref : **La gravité mène la danse aussi bien pour les corps célestes que pour les corps qui chutent.**



Avant Einstein 4 : Maxwell et l'électromagnétisme

La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

- L'électromagnétisme tire son nom du fait qu'avant les travaux de Maxwell, l'électricité et le magnétisme étaient vu comme distincts. Maxwell montre en 1860 qu'ils sont en fait liés, mais là n'est pas le plus fondamental.
- La lumière (visible), les ondes radio, les rayons X ... sont tous de même nature : ce sont des ondes électromagnétiques que seules distinguent leurs fréquences respectives. La lumière est donc une onde, qui se déplace à une vitesse **finie**. Elle cesse donc d'être envisagée comme un phénomène instantané et on va commencer à s'intéresser à déterminer cette vitesse.

En bref : **La lumière est une onde électromagnétique qui se déplace à une vitesse nécessairement finie.**



La Théorie de la relativité restreinte

La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

- Élaborée par Einstein en 1905 en s'appuyant sur la relativité galiléenne et les équations de Maxwell.
- Pose que la vitesse de la lumière reste la même dans tous les référentiels inertiels, même quand ils sont en mouvement les uns par rapport aux autres.
- Cette constance de la vitesse de la lumière implique l'inconstance des distances et de l'écoulement du temps.
- La vitesse de la lumière dans le vide est la limite absolue à toute vitesse.
- $E = mc^2$: équivalence (et convertibilité) entre énergie et masse, à raison de 10^{14} joules par gramme.

En bref : **L'espace-temps est élastique et la masse c'est de l'énergie.**



La Théorie de la relativité générale

La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

- En 1915, la relativité devient une **théorie de la gravitation** (ce que n'est pas la théorie de la relativité restreinte). Englobe et supprime la théorie de la gravitation universelle de Newton, en résolvant les imprécisions gênantes (Mercure).
- La distribution de l'énergie, notamment sous forme de masse, courbe l'espace-temps. Cette courbure provoque une accélération qui est la manifestation de la gravité.
- Prédications remarquables : expansion de l'Univers, ondes gravitationnelles, trous noirs ...
- Laisse la possibilité d'un Univers fini ou infini.

En bref : **La gravitation n'est pas une force (au sens Newtonien), mais la manifestation de la courbure de l'espace-temps.**



Alors, fini ou infini ?

La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

Si l'Univers est bien homogène (en plus d'être isotrope), alors à grande échelle sa courbure générale est la même partout. Mais cela n'implique pas que cette courbure soit nulle.

Selon la théorie de la relativité générale, la finitude de l'Univers dépend de sa courbure générale :

- Si elle est strictement positive (Univers (hyper)sphérique), alors il est forcément fini (mais sans bord, on peut en faire le tour, comme pour la Terre).
- Si elle est nulle (Univers plat) ou négative (Univers hyperbolique), alors il est forcément infini.

Visionnage de la vidéo de Balade Mentale intitulée L'Univers est-il infini ?

<https://www.youtube.com/watch?v=66HgM5z0MBc>



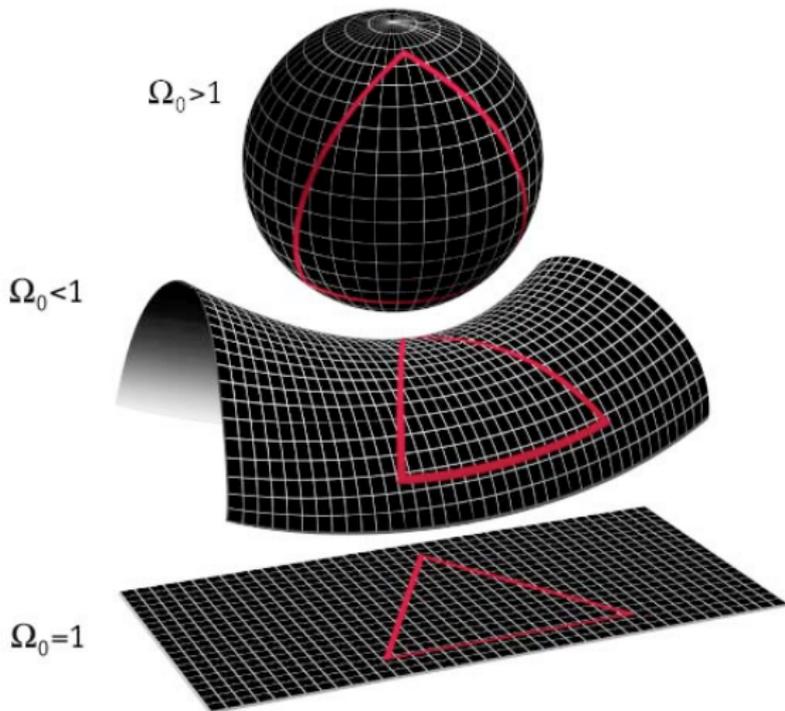
La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion



MAP990006



La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

Des Trous dans la raquette



Trous noirs, trous blancs, trous de vers

La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

- Les trous noirs font partie des prédictions remarquables de la théorie de la relativité générale que l'on a finalement pu observer.
Mais la nature exacte de ce qui se trouve au delà de l'horizon des évènements demeure bien mystérieuse.
- La théorie prédit également la possibilité des trous blancs et de trous de vers ; mais on n'en a pas (encore ?) observé.



La Matière noire

La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

Les mouvements des étoiles d'une galaxie autour de son centre s'expliquent bien avec les équations de la théorie de la relativité générale ... à condition que la masse de la galaxie soit beaucoup plus importante que celle correspondant à la matière « ordinaire » que l'on peut y observer, en particulier concernant les vitesses relatives des étoiles proches du centre et de celles proches de la périphérie.

Il existe donc une source de masse, que l'on nomme « matière noire » faute d'en savoir plus à son sujet, qui semble environ 5 fois plus abondante que la matière ordinaire. Sa nature n'est ni expliquée, ni prédite par la théorie de la relativité générale.



L'Énergie sombre

La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

L'expansion de l'Univers, du moins sa possibilité, était prédite par la théorie de la relativité. Mais pas son accélération telle qu'on l'observe, à moins d'introduire une constante qui a fait hésiter Einstein.

Faute d'en connaître la nature, on qualifie de « sombre » l'énergie qui l'alimente. A l'échelle de tout l'Univers, cette quantité d'énergie est colossale, au point de constituer 68,3 % de toute l'énergie qui s'y trouve.

Ajoutons à cela les 26,8 % attribués à la matière noire (la masse étant convertible en énergie) et cela ne laisse que 4,9 % à la matière ordinaire et à la gravitation qu'elle est censée générer. Il y aurait donc encore largement de quoi compléter la théorie de la relativité pour expliquer tout l'Univers.



La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

Conclusion



Résumé général

La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

- La théorie physique la plus élaborée pour décrire ce qui se passe à grande échelle est celle de la **relativité générale**.
- C'est une théorie de la **gravitation**, plus complète que celle de Newton, qui fait de cette « force » le grand orchestrateur de l'organisation de la matière dans l'Univers.
- Seulement, ces lois ne permettent d'expliquer que 4,9 % de la quantité d'énergie que l'on peut observer ou calculer à partir d'observations. Il y a donc des explications à chercher ailleurs.



A venir

La Physique
de l'infiniment
grand

La Taille de
l'Univers

La Théorie de
la relativité
d'Einstein

Des Trous
dans la
raquette

Conclusion

Cet exposé était le premier épisode, sur trois, d'une série d'introduction à cosmologie. Il sera suivi par :

- La Physique de l'infiniment petit
- La Physique de tout