



La relativité générale

PHI 6346

Séance 8

Jonathan Simon



Programme

- 1) Gravité et acceleration
- 2) Le variété, le champ métrique et les champs de matière
- 3) Transformations arbitraires de coordonnées
- 4) L'argument du trou
- 5) Réponses substantivistes
- 6) Réponses relationnistes
- 7) Réponses structuralistes



Gravité et accélération



Gravité et accélération

- ▶ La relativité restreinte nous dit ce qui est invariant, étant donné que nous considérons que deux cadres inertiels sont « équivalents », c'est-à-dire qu'aucun cadre d'inertie n'est « privilégié »
- 



Gravité et accélération

- Rappelez-vous, un cadre inertiel est un cadre représentant le point de vue d'un objet qui n'accélère pas (c'est-à-dire qui a une vitesse constante dans une direction constante, donc, sur lequel aucune force n'agit).
 - Puisqu'un tel objet ne change pas de vitesse ou de direction, il correspond à une ligne droite.
- 



Gravité et accélération

- (strictement, Galilée serait d'accord avec tout cela : Galilée et Lorentz ont une conception différente de ce qui est invariant seulement parce qu'ils ne sont pas d'accord sur l'existence d'une limite à la vitesse de la causalité.



Gravité et accélération

- La relativité générale nous donne une nouvelle conception de ce qui est invariant, basée sur une classe encore plus large de **symétries** - c'est-à-dire une classe encore plus large de cadres de référence qui ne sont pas privilégiés les uns par rapport aux autres :
- Avant : les cadres inertiels. Maintenant : les cadres inertiels et les cadres qui accélèrent à cause de la gravité,



Gravité et accélération

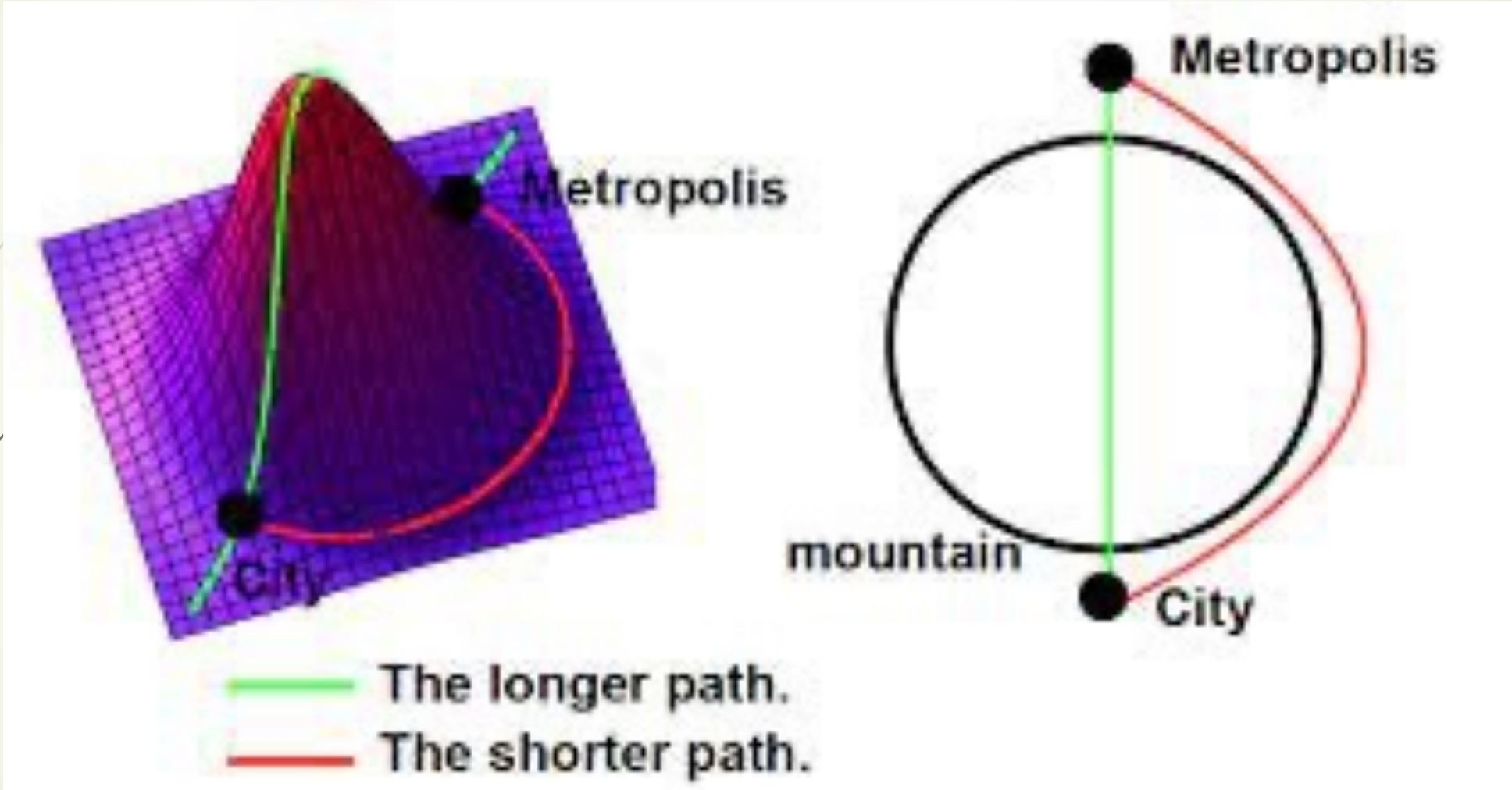
- relativité restreinte : un échange entre l'espace et le temps - ce qui est une distance spatiale dans un cadre est une distance temporelle dans un autre.
- relativité générale : cela, et aussi un échange entre l'inertie et l'accélération ainsi que le compromis entre la gravité et l'accélération due à la gravité.



Gravité et accélération

Comment ?:

La gravité est la courbure de l'espace. L'espace-temps lui-même est courbé, donc la notion de « ligne droite » n'est pas pertinente (ou au moins, n'est pas objective). Nous avons plutôt besoin de la notion de « chemin le plus court » entre deux points (**une géodésique**).





Gravité et accélération

- L'important : il n'y a pas vraiment une dimension supplémentaire de collines.
 - *C'est juste une visualisation d'un espace 2d dans un espace 3d : mais dans l'exemple il n'y a pas vraiment de 3ème dimension.*
- Au lieu de cela, la courbure **n'est que** le fait que la ligne rouge est plus courte que la ligne verte.



Gravité et accélération

Cela signifie que vous ne pouvez pas lire la structure métrique (la structure de distance réelle, invariante et sous-jacente) de l'image: il faut « lire la registre »

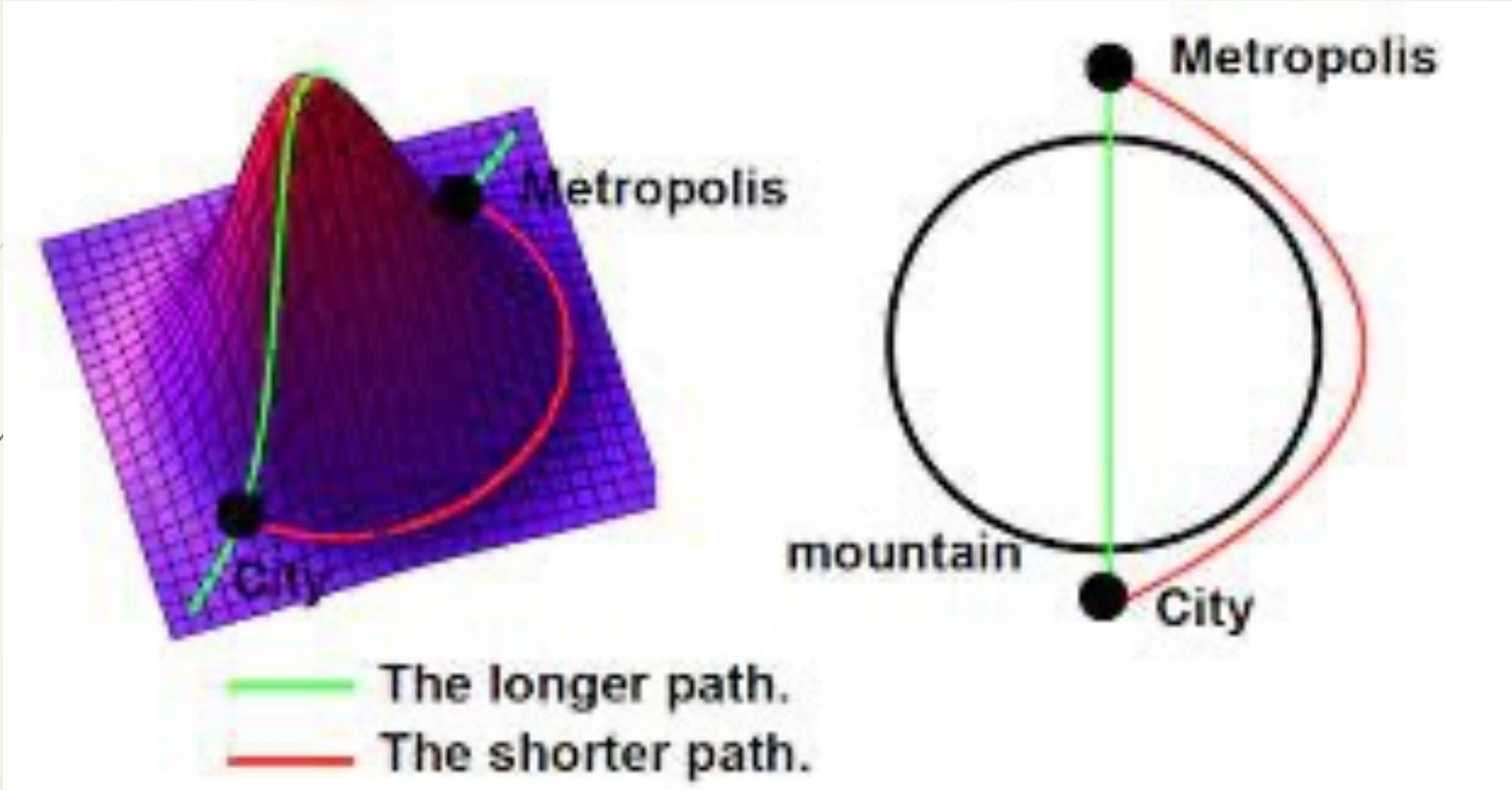
Une autre image qui ferait paraître la ligne verte plus longue et incurvée et la ligne rouge plus courte et droite serait également bonne (à condition de conserver les annotations notées sur le côté, précisant qu'ici les choses sont bien « telles que représentées »).



Gravité et accélération



(cependant, gardez à l'esprit que, compte tenu de toutes les façons dont nous pouvons tracer des distances plus courtes et plus longues en imaginant des collines, il n'y aura pas une seule façon d'étirer ou plier les choses de sorte que les lignes les plus courtes entre deux points soient toujours droites dans l'image.)





Le variété, le champ métrique et les champs de matière



Le variété, le champ métrique et les champs de matière

La façon standard de donner un sens à tout ça :

3 éléments :

- 1) La variété (the spacetime manifold)
- 2) le champ métrique
- 3) les champs de matière



Le variété, le champ métrique et les champs de matière

➤ 1) La variété (the spacetime manifold):

L' « espace » sous-jacent de l'image elle-même, les emplacements des points le long du chemin

(ce qui donne l'«impression» que la ligne verte est plus courte que la ligne rouge)



Le variété, le champ métrique et les champs de matière

► 2) le champ métrique

Le registre qui vous donne les longueurs des chemins entre les points (considérer la distance des chemins comme la chose principale : aucune notion utile de distance entre les points, indépendante du chemin, n'est possible)

(il s'avère que vous pouvez définir ceci localement, comme un champ, chaque point vous donnant des longueurs de "chemins infinitésimaux")



Le variété, le champ métrique et les champs de matière

➤ 3) les champs de matière

Les champs (définis sur des points) qui vous indiquent la quantité de matière



Le variété, le champ métrique et les champs de matière

Globalement, la structure de la théorie est la suivante : vous avez besoin de la variété pour formuler les champs métriques et de matière, mais ce sont eux qui font tout le travail.

La courbure (réelle, invariante) de l'espace-temps est donnée par le champ métrique, et les champs de matière contraignent les champs métriques.

Le variété, le champ métrique et les champs de matière

Les équations de champ d'Einstein expriment ces contraintes

Einstein's Field Equation

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

*(tells matter/energy
how to curve spacetime)*

*(tells matter/
energy how to
move through
curved
spacetime)*

ifunny.co



Le variété, le champ métrique et les champs de matière

Une solution à ces équations vous donne une configuration spécifique de la réalité, avec une courbure de l'espace-temps qui satisfait aux contraintes données par la distribution de la matière.

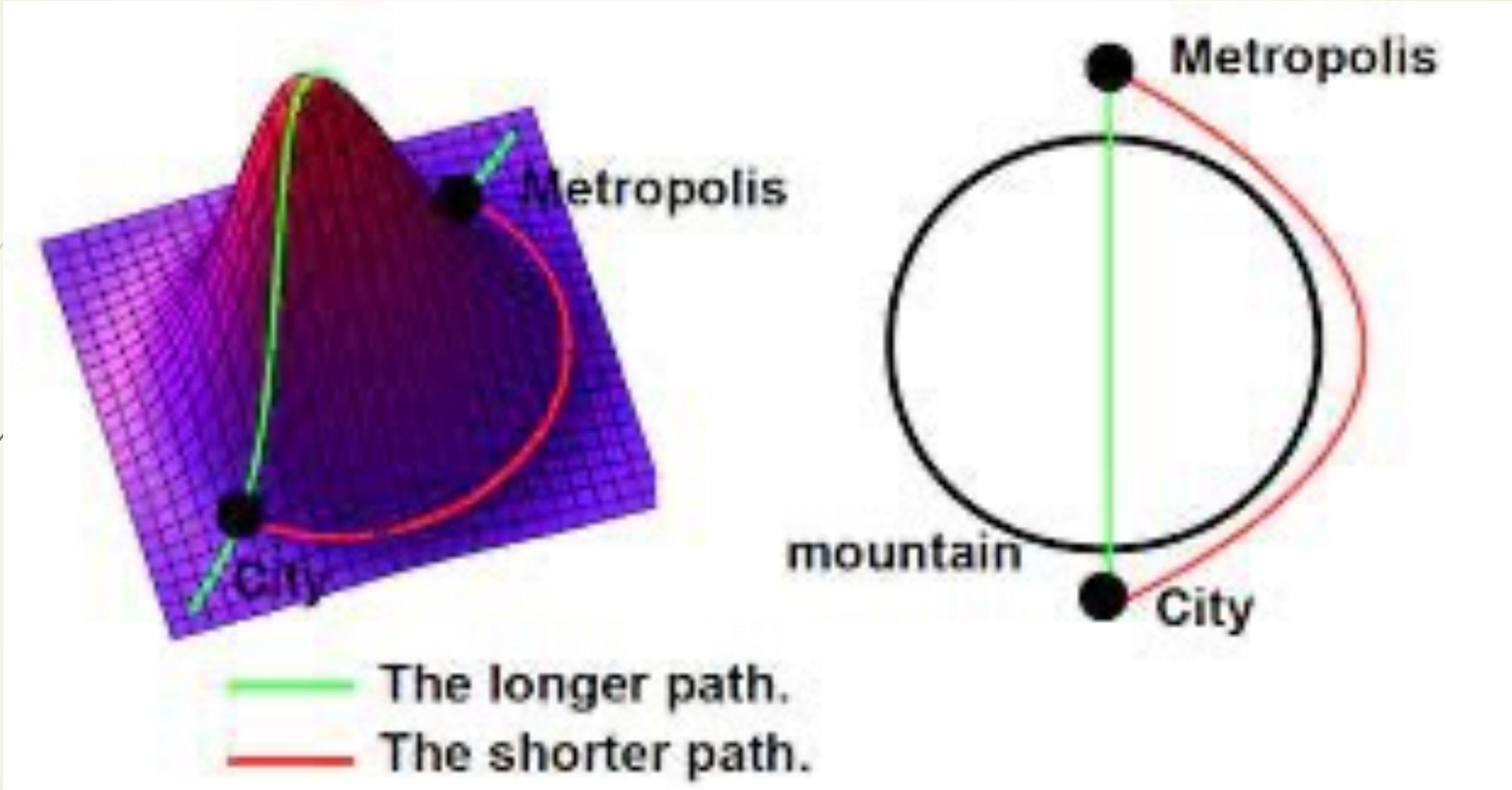


Transformations arbitraires de coordonnées



Transformations arbitraires de coordonnées

- Il est déjà implicite dans l'histoire des lignes rouges et vertes que la "structure suggérée" de l'espace sous-jacent n'a pas d'importance.
- Il semble que ce soit une "structure excédentaire"





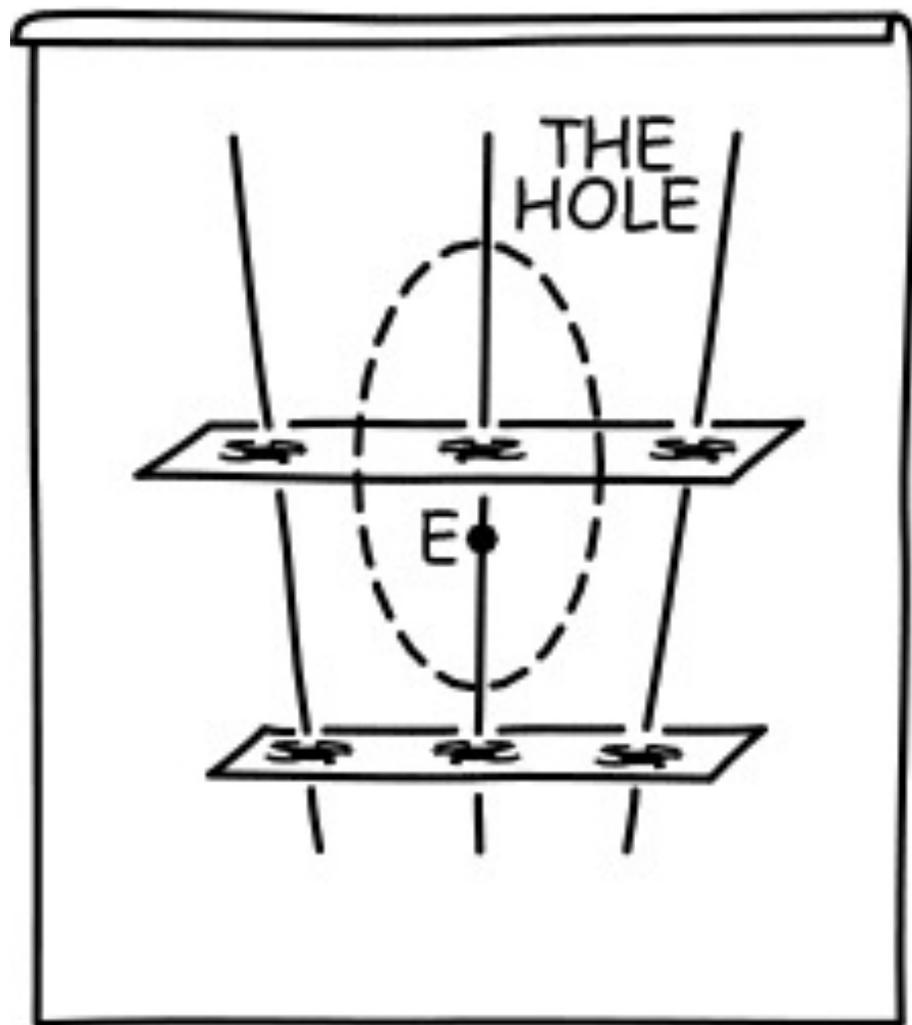
Transformations arbitraires de coordonnées

- ▶ Par exemple, en regardant l'image sur l'écran, nous imaginons qu'il existe une métrique d'arrière-plan donnant la «distance réelle» entre les deux points, suggérant que la ligne verte est plus courte
 - ▶ Le point crucial est que la théorie n'utilise pas cette «métrique d'arrière-plan» (et en général, il n'y a aucune raison de penser qu'elle est définie : cela équivaudrait au cadre de repos absolu de Newton).
- 

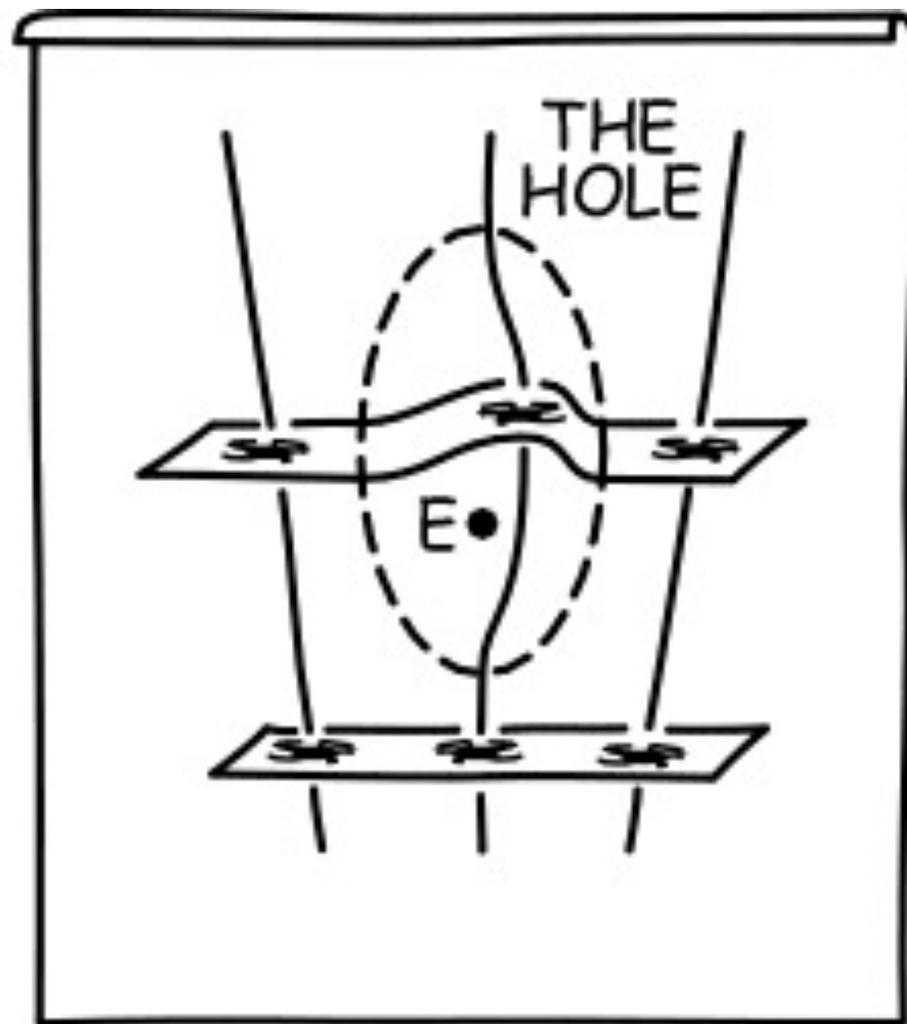


Transformations arbitraires de coordonnées

- ▶ En d'autres termes, si l'on donne n'importe quel schéma de cartes de coordonnées pour l'espace, et si l'on parvient à plier ce schéma dans un autre schéma, on obtiendra une autre solution aux équations (intuitivement, une solution équivalente) : les lois ne se soucient pas de cette distinction.
- ▶ **(covariance générale)**



Fields before hole transformation



Fields after hole transformation



L'argument du trou



L'argument du trou

- Comme vous pouvez le voir, l'argument du trou tombe directement de l'énoncé de la covariance générale.
- Notez qu'Einstein lui-même a discuté de l'argument, et en fait, ses motivations dans le développement de la relativité générale étaient machiaques - il voulait réfuter le relationnisme au sujet de l'espace absolu.



L'argument du trou

- Intuitivement : le problème est que vous pouvez avoir deux modèles qui ne diffèrent que sur les points de l'espace-temps qui ont quelles valeurs de champ à l'intérieur du trou.
- Mais cela signifie qu'une configuration complète du système avant le début du trou ne détermine pas l'état du système à l'intérieur du trou

- P1. There are models of general relativity that differ on which field values are instantiated at which manifold points within a 'hole', but not elsewhere.
Let M, M' be such a pair of diffeomorphically-related models.
- P2. Substantivalism is committed to the claim that M, M' represent physically distinct situations.
- P3. Substantivalism is committed to the claim that M, M' each represent a physically possible situation.
- P4. If M, M' represent distinct physically possible situations, then indeterminism holds.
- Therefore,
- C. Substantivalism is committed to indeterminism.

(Greaves 2011)



L'argument du trou

- Rejeter P2 : (substantivalisme sophistiqué) : il existe des points de l'espace-temps, mais le "difféomorphisme" n'est qu'une façon différente de représenter la même configuration de ces points. (Pooley)
- 



L'argument du trou

- *Comment?*

- Qu'est-ce qu'un monde possible ? Supposons que l'"identité à travers les mondes" soit une relation de contrepartie plutôt qu'une identité stricte.
- On peut alors dire que les difféomorphismes sont des relations de contrepartie (ainsi, on ne représente les contreparties que comme ayant les mêmes valeurs de champ).



L'argument du trou

- Rejeter P3 : (essentialisme métrique) en fait il y a un cadre privilégié, donné par la "vraie" carte des valeurs métriques aux points de l'espace-temps...(Maudlin)



L'argument du trou

- *Comment?*

- *Analogue au privilège d'un cadre en mécanique newtonienne ou relativiste spéciale. L'espace se révèle simplement configuré de cette façon plutôt que d'une autre. Les symétries des lois sont des symétries de ce que nous pouvons observer, ce qui n'est pas indicatif de la structure invariante.*



L'argument du trou

- Accepter C: (l'indéterminisme haecceitiste) : accepter que la relativité générale est indéterministe dans le sens pertinent (mais peut noter que l'indétermination ne concerne rien de "qualitatif", juste "haecceitistique")
- (Brighouse)



L'argument du trou

- *Comment? Si l'indétermination existe, ne devrait-elle pas être énoncée dans les lois (comme dans les théories d'effondrement de la mécanique quantique) ?*

Réponse : peut-être oui pour l'indétermination qualitative, pas nécessairement pour l'indétermination haecceitistique...



L'argument du trou

Ce sont là trois formes de substantivisme.

Quelle est l'alternative relationnelle ?

Existe-t-il d'autres alternatives "structuralistes" ?



L'argument du trou

Dasgupta:

Le substantivisme peut être sophistiqué de deux manières : soit a) parce que les faits qualitatifs fondent (expliquent métaphysiquement) les faits relatifs à l'identité des points dans le collecteur, soit b) au moyen d'une revendication modale étrangère ou "brute".



L'argument du trou

Dasgupta:

Substantivisme mince : les faits concernant les points de l'espace-temps sont fondés sur des faits qualitatifs concernant la distribution des valeurs du champ.

substantivisme épais : les faits concernant les points de l'espace-temps sont quelque chose de plus et au-delà des faits qualitatifs.



L'argument du trou

Au fait, quelle est exactement l'alternative relationnelle ? Il n'y a que les champs de la matière et de la métrique, liés d'une certaine manière ? (ou bien le substantivalisme mince est-il aussi une version du relationnisme ?)

Options : théorie du faisceau de tropes, généralisme functoriel de Dasgupta...



L'argument du trou

Généralisme functoriel (algèbre globale) de Dasgupta...

“il y existe x, y tel que $P_x \text{ et } P_y$ ”

“P obtient doublement “



L'argument du trou

...Mais si nous n'avons besoin que des champs de matière et de métrique, pourquoi nous donnons-nous la peine de mentionner les manifestes dans les formulations ? Pourquoi ne pas simplement dire que le champ métrique est l'espace-temps ?



L'argument du trou

(en particulier, n'avons-nous pas besoin de faire appel à des connexions spatiales entre, par exemple, les "obtentions" de P pour spécifier la situation ? n'est-ce pas ce que fait le champ métrique ?)



L'argument du trou

Analogie de l'argument du seau : la meilleure façon de comprendre les champs métriques et de matière est de les considérer comme des distributions de valeurs dans l'espace-temps (comme pour les champs classiques tels que le champ électromagnétique...).



L'argument du trou

Lehmkuhl:

substantivisme vs supersubstantivisme :

le substantivisme dit : l'espace-temps est l'endroit où se trouvent les autres objets

le supersubstantivisme dit : l'espace-temps est le seul objet : le reste est juste donné par les propriétés de l'espace-temps.



L'argument du trou

Greaves:

Existe-t-il d'autres alternatives **structuralistes**?

Réponse : pas vraiment. soit elles s'effondrent dans ce que nous avons déjà, soit elles reposent sur des promesses non tenues...