



Le coté obscur de la gravité

Frédéric Henry-Couannier
CPPM/RENOIR Marseille
www.darksideofgravity.com

Plan

- La gravité
 - La gravité selon Newton
 - La gravité selon Einstein: RG
 - La gravité avec coté obscur: DG
- DG « locale »
- DG « globale »
- Conclusions

La gravitation selon Newton

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{u}_{12}$$

- Attractive
- Ne concerne que les corps massifs
- Force instantanée à distance
- Symétrie entre action et réaction
- L'accélération subie par un corps ne dépend pas de sa masse

$$\cancel{m} \vec{g}_{\text{gravitation}} = \cancel{m} \vec{a}_{\text{accélération}}$$



Relativité Générale: La gravité selon Einstein

L'intuition physique: Le principe d'équivalence

Gravitation = Accélération



Il est possible de supprimer localement
les effets de la gravitation en passant dans un système de
coordonnées accéléré:

1. Pour toute expérience de physique non gravitationnelle :
Principe d'équivalence d'Einstein: EEP
2. Pour toute expérience de physique gravitationnelle :
Principe d'équivalence fort: SEP

L'expression mathématique du principe d'équivalence

1. Imposer aux équations du MS la symétrie sous transformation générale de coordonnées (condition sans réel contenu physique) y fait apparaître un champ $g_{\mu\nu}$ et ses dérivées.
 2. $g_{\mu\nu}$ est identifié au champ gravitationnel
1. & 2. → équations de la physique valables pour des observateurs quelconques et incluant la gravité
1. & 2. → le principe d'équivalence est respecté

La Relativité Générale 1905-1915: l'expression unique de EEP+SEP ?

Une théorie de la gravitation complète doit décrire:

1. Comment les champs du MS subissent la gravité:

Couplage de $g_{\mu\nu}$ aux champs du MS $\Leftrightarrow$ EEP (I)

2. Comment les champs du MS et $g_{\mu\nu}$ sourcent la gravité:

(I)+Couplage de $g_{\mu\nu}$ à lui même

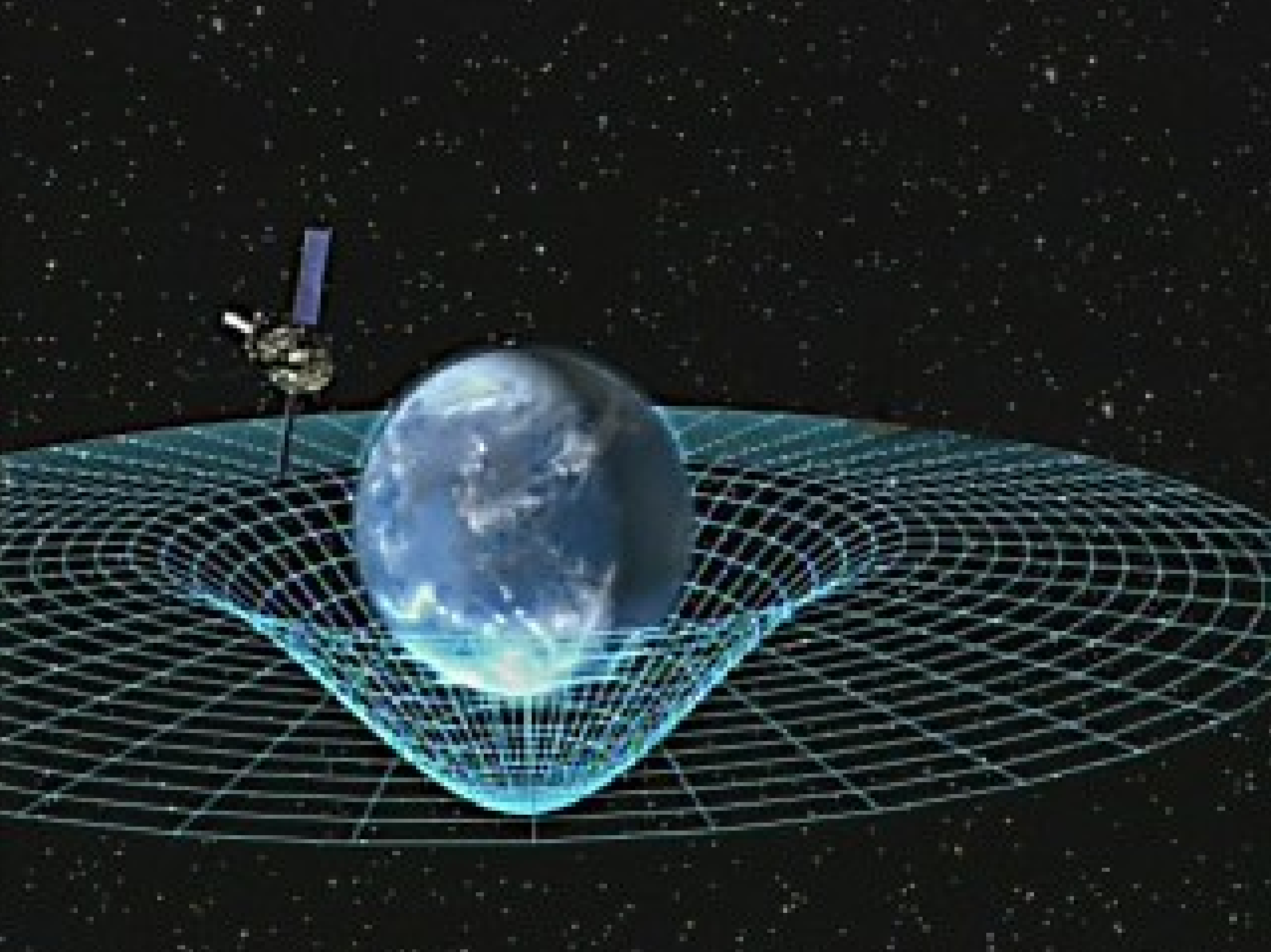
RG $\rightarrow$ SEP

SEP $\nrightarrow$ RG

La RG: une théorie géométrique

En RG, $g_{\mu\nu}$ est un champ décrivant des déformations et courbures de l'espace-temps: la métrique!

- Trajectoires = géodésiques
- Perte de l'invariance de Poincaré globale et du tenseur énergie impulsion associé
- Perte des symétries discrètes spatio-temporelles



La RG: une théorie relativiste de la gravitation

- Energie, impulsion, pression incluses dans $T_{\mu\nu}$ sourcent la gravité ($\neq$ Newton)
- La gravité est propagée par des OG à la vitesse de la lumière ($\neq$ Newton)
- Point fort:
 - Grande beauté conceptuelle (Principe d'équivalence) et triomphe de la symétrie
 - Théorie remarquablement validée par une batterie de tests de précision
- Points faibles:
 - Calcul exact impossible en général, calcul approximatif extrêmement fastidieux en pratique
 - Incompatibilité notoire avec la mécanique quantique

Secteurs à explorer

- Le domaine PPPN
- La pression comme source de la gravité
- L'horizon de trou noir
- Les ondes gravitationnelles (polarisation, vitesse)

Des anomalies de la gravité ?

- Effet Pioneer
- Anisotropies dans le quadrupôle du CMB
- La cosmologie (matière noire + énergie noire + inflation + ... ?!?!)



La gravité avec son côté obscur: DG

Vers une théorie non géométrique: DG

- RG: $g_{\mu\nu}$ est la métrique. $\left[g_{\mu\nu} \right]^{-1} = g^{\mu\nu} = g^{\mu\rho} g^{\nu\sigma} g_{\rho\sigma}$

la théorie est construite à partir du couple $g_{\mu\nu}, g^{\mu\nu}$

- DG: $g_{\mu\nu}$ n'est pas la métrique qui est $\eta_{\mu\nu}$

$$\left[g_{\mu\nu} \right]^{-1} = \tilde{g}^{\mu\nu} = \eta^{\mu\rho} \eta^{\nu\sigma} \tilde{g}_{\rho\sigma} \neq g^{\mu\nu} = \eta^{\mu\rho} \eta^{\nu\sigma} g_{\rho\sigma}$$

la théorie est construite à partir des couples: $g_{\mu\nu}, \tilde{g}^{\mu\nu}$ et $\tilde{g}_{\mu\nu}, g^{\mu\nu}$

DG réhabilite les symétries globales d'espace-temps

● L'espace temps homogène et statique demeure globalement Lorentzien comme en TQC

- Symétries d'espace-temps globales et courant de Noether associé sont valides
- Symétries discrètes d'espace-temps idem
- Les solutions $g_{\mu\nu}, \tilde{g}_{\mu\nu}$ de DG satisferont des relations telles que:

$$g_{\mu\nu}(t) \overset{T}{\longleftrightarrow} \tilde{g}_{\mu\nu}(-t) \equiv [g_{\mu\nu}]^{-1}(-t) = g_{\mu\nu}(t)$$

→ les deux gravités sont conjuguées sous symétries discrètes d'espace-temps !!

Energies négatives et inversion du temps

- En RR, E s'inverse :

1) instabilités avec $E < 0$

2) $E < 0$ non manifestées dans interactions EM, faible et forte

- En RR+MQ avec T unitaire E s'inverse

→ 1)+2)+ incohérence interne: 3)

avec T antiunitaire E invariante

- En RR+MQ(T unitaire)+DG: E s'inverse « du point de vue de $g_{\mu\nu}$ », et on saute dans $\tilde{g}_{\mu\nu}$ → 1),2) et 3) résolus

$$x, y, z, t \xrightarrow{T} x, y, z, -t$$

$$p_x, p_y, p_z, E \xrightarrow{T} p_x, p_y, p_z, -E$$

$$e^{i(Et - \vec{p}\vec{x})} \xrightarrow{t \rightarrow -t} e^{i(-Et - \vec{p}\vec{x})}$$

$$e^{i(Et - \vec{p}\vec{x})} \xrightarrow{t \rightarrow -t, i \rightarrow -i} e^{i(Et + \vec{p}\vec{x})}$$

La gravité avec coté obscur

- L'action du MS est comme en RG → EEP respecté

$$S_{MS} [g_{\mu\nu}, \dots] + \tilde{S}_{MS} [\tilde{g}_{\mu\nu}, \dots]$$

- Le monde des particules qui vivent dans la gravité conjuguée est invisible de notre point de vue
- L'action gravitationnelle:
$$S_{\text{gravité}} [g_{\mu\nu}, \dots] + \tilde{S}_{\text{gravité}} [\tilde{g}_{\mu\nu}, \dots]$$
- Les équations de la gravité se simplifient de manière spectaculaire
- Le calcul gravitationnel devient élémentaire dans toutes les situations

Les équations de DG

$$\begin{array}{c} \text{T} \\ \swarrow \quad \searrow \\ S_{RG} + \tilde{S}_{RG} \end{array}$$

On extrémise l'action
& élimine

$$\tilde{g}_{\mu\nu}$$

Nouvelles équations

Forme isotrope et x/t symétrique des gravités conjuguées

- Formes isotropes:

$$g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} B & & & \\ & A & & \\ & & A & \\ & & & A \end{bmatrix}, \quad \tilde{g}_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} B^{-1} & & & \\ & A^{-1} & & \\ & & A^{-1} & \\ & & & A^{-1} \end{bmatrix}$$

- Symétrie des rôles de B et A (symétrie naturelle entre tachyons et bradions)
→ 2 théories possibles:

$$B = -1/A$$

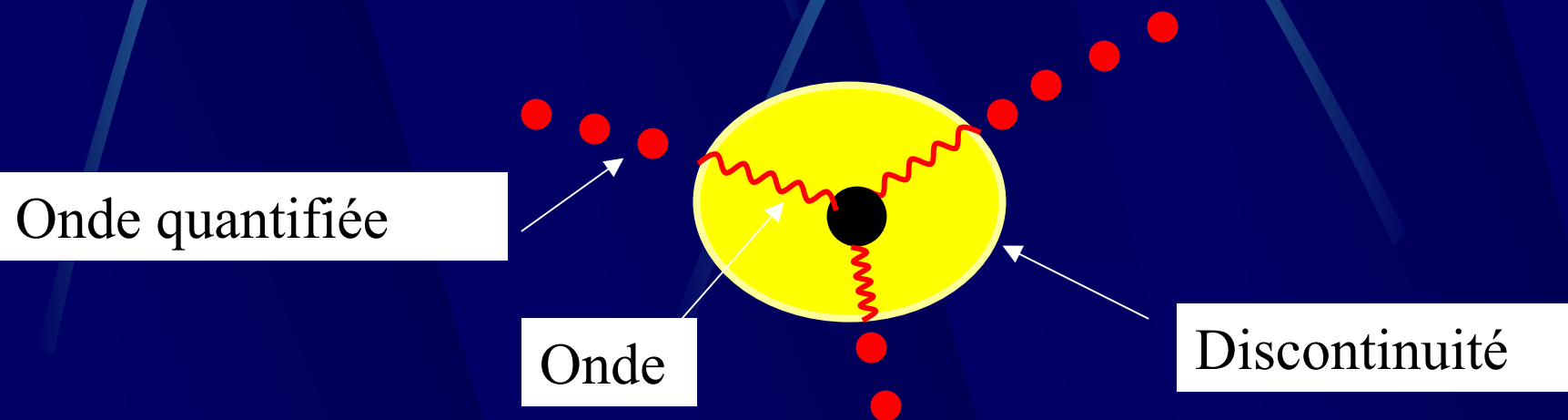
et

$$B = -A$$

DG: deux théories

La théorie se divise en deux secteurs qui se partagent des domaines spatiaux distincts:

- La gravité « locale » statique et instantanée: $B=-1/A$
- La gravité « globale » propagée (loin de toute masse) et les OGs: $B=-A$





La gravité globale

Relativité Générale:

Inverser le temps

=

Remonter le temps

Rayon de
L'univers

 Inversion du temps

$t=0$: Big Bang

$t \rightarrow +\infty$

Rayon de
l'univers

$f(t)$

Gravité obscure:

Inverser le temps

=

Sauter dans un autre
univers

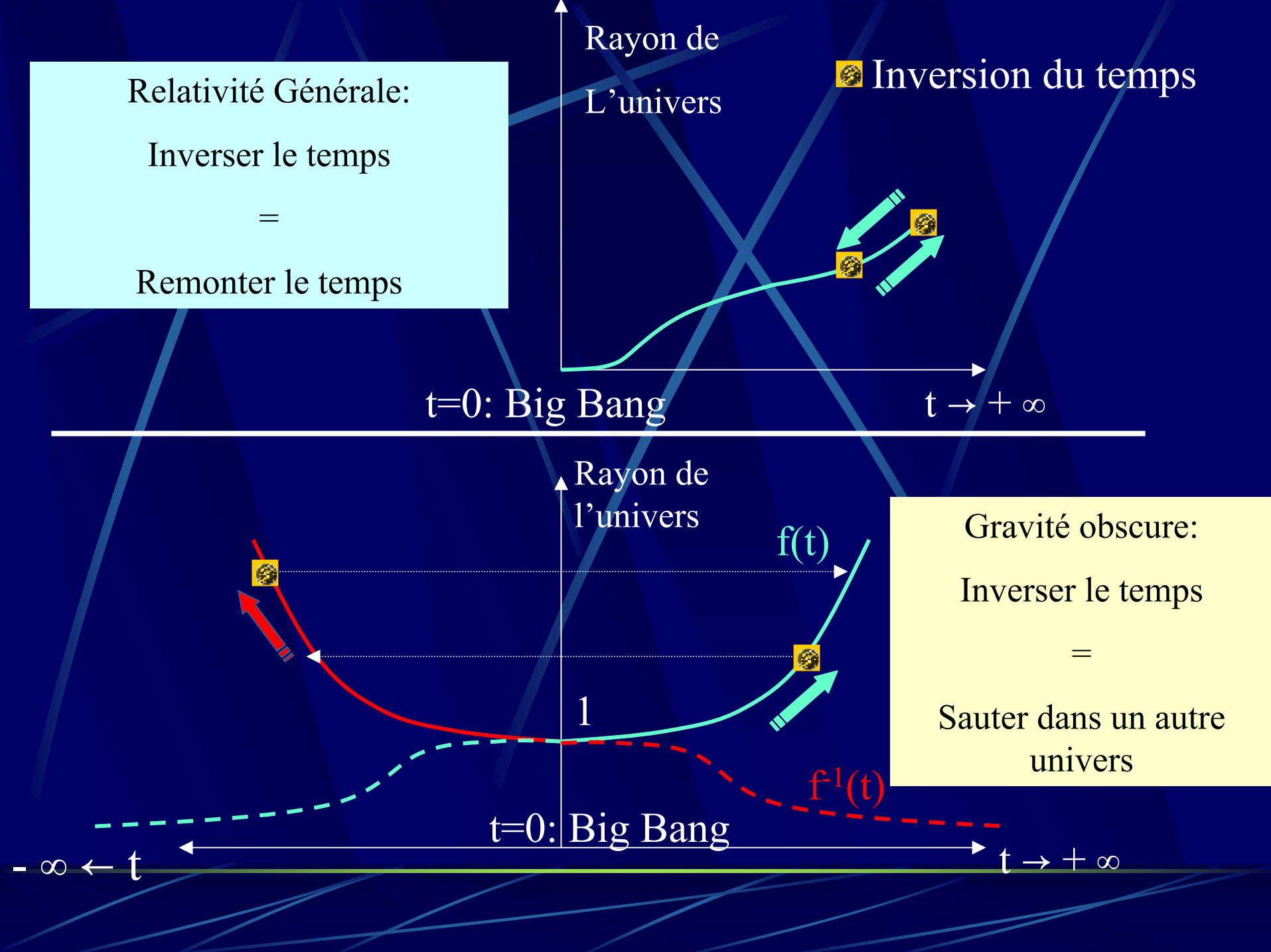
1

$t=0$: Big Bang

$f^1(t)$

$t \rightarrow +\infty$

$-\infty \leftarrow t$



La cosmologie

La symétrie détermine complètement l'évolution des univers indépendamment de leur contenu :

- Univers spatialement plats
- Univers en accélération constante
- Pas de singularité de Big Bang et très faible taux d'expansion à l'origine du temps
- Univers deux fois plus vieux

Magnitude vs redshift SNA test (SCP 2003)

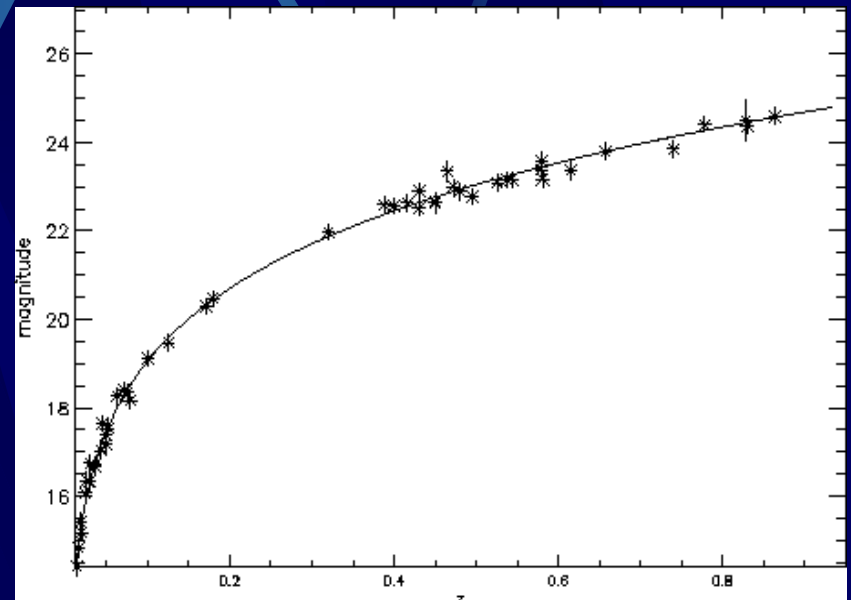
Ajustement par $a(t) \propto t^\alpha$



$$\alpha = 1.6 \pm 0.3 (\text{stat})$$

Compatible avec
l'accélération
constante:

$$\alpha = 2$$



Les Ondes Gravitationnelles

- OGs se propagent à c_{light} → bonne perte d'énergie par rayonnement du pulsar binaire
- OGs indétectables par les interféromètres
- Echange d'OGs quantifiées à longue distance → interaction gravitationnelle
- OGs ont une composante longitudinale comme des ondes acoustiques: découverte par Chandra au centre de l'amas de Persée!!



La gravité locale

La gravité locale

- SEP est respecté
- Gravité instantanée à distance
- La masse s'inverse d'une gravité à l'autre (idem théorie de JP Petit)
 - Objets vivant dans la même gravité s'attirent
 - Objets vivant dans des gravités différentes se repoussent



La gravité d'une masse M

DG:

$$g_{ii}(r) = A = e^{2MG/r} \approx 1 + 2 \frac{MG}{r} + 2 \frac{M^2 G^2}{r^2}$$

$$-g_{00}(r) = \frac{1}{A} = e^{-2MG/r} \approx 1 - 2 \frac{MG}{r} + 2 \frac{M^2 G^2}{r^2} - \frac{4}{3} \frac{M^3 G^3}{r^3}$$

RG:

$$g_{ii}(r) = \left(1 + \frac{MG}{2r}\right)^4 \approx 1 + 2 \frac{MG}{r} + \frac{3}{2} \frac{M^2 G^2}{r^2}$$

$$g_{00}(r) = \frac{\left(1 - \frac{MG}{2r}\right)^2}{\left(1 + \frac{MG}{2r}\right)^2} \approx 1 - 2 \frac{MG}{r} + 2 \frac{M^2 G^2}{r^2} - \frac{3}{2} \frac{M^3 G^3}{r^3}$$

La gravité locale de DG vs la RG

- En régime de faible gravité (système solaire), écarts Post-Post-Newtoniens avec la RG
- En régime de forte gravité, écarts importants avec la Relativité Générale: plus de Trou noir!

Les sources de la gravité locale

- Seule la masse source la gravité (= Newton)
- La gravité a une « forme statique et isotrope » pour toutes les sources dans un domaine spatial



- Formalisme PPN invalidé en DG mais OK avec tous les tests d'EEP et SEP
- Gravito-magnétisme: DG et RG très différentes

Tests du gravito-magnétisme avec Gravity Probe B

- Test au % de l'effet d'entraînement prédit par la RG (précision de $5 \cdot 10^{-4}$ arcsec/an)
- Pas d'effet d'entraînement dans le modèle avec coté obscur
- A la place: un effet très spécifique dépendant de la vitesse de la terre/soleil

L'effet Pioneer

- Les faits: une dérive en fréquence (blueshift) des ondes radio renvoyées par Pioneer de 20 à 70 U.A:

$$\frac{\dot{z}}{z} \approx -H_0$$

- Effets systématiques envisagés ont tous été écartés
- Interprétations possibles:

- Une décélération anormale constante dirigée vers le soleil :

$$a_p = (8.74 \pm 1.33) \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2 \quad : \text{exclu!}$$

- Une dérive temporelle de $g_{\mu\nu}$ comme si les horloges de la sonde dérivent / celles sur terre

$$a(t)_{\text{Terre}} \rightarrow a(t)_{\text{Pioneer}} = \frac{1}{a(t)_{\text{Terre}}}$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{z}}{z} = -H_0$$

L'effet Pioneer en DG

- Background & perturbation superposés :

$$d\tau^2 = a^2(t)e^{Gm/r}dt^2 - \left[a^2(t)e^{Gm/r} \right]^{-1} d\sigma^2$$

EEP&SEP OK

- Effet trop faible pour être détecté dans les autres tests de la gravité dans le système solaire
- Discontinuité de la gravité entre la terre et la sonde : $a(t) \rightarrow 1/a(t) \rightarrow$ effet Pioneer

Anisotropies du quadrupôle du CMB corrélées avec le mouvement de la terre

$$d\tau^2 = a^2(t)e^{Gm/r}dt^2 - \frac{1}{a^2(t)e^{Gm/r}}d\sigma^2 \xrightarrow{a(t) \rightarrow 1/a(t)} d\tau^2 = dt^2 - d\sigma^2$$

Discontinuité
aux confins
de la galaxie

γ du CMB qui se
réfléchit sur la
discontinuité

$$\frac{1}{a^2(t)}dt^2 - a^2(t)d\sigma^2$$

Soleil

Terre

Planète
géante

Pioneer

Discontinuité
qui se propage

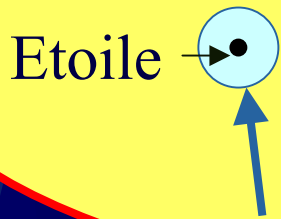
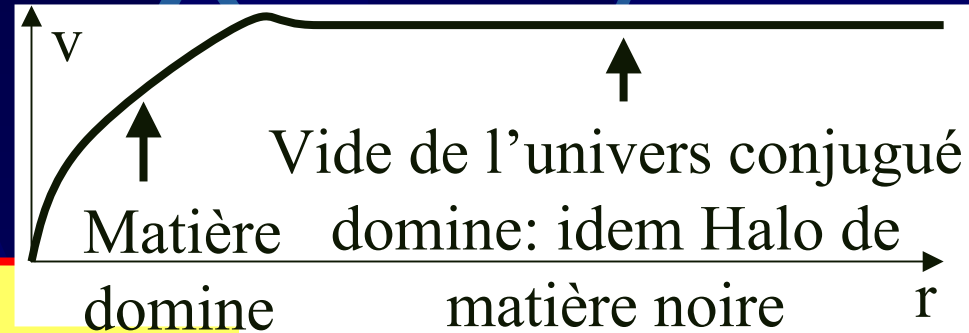
$$a^2(t)dt^2 - a^2(t)d\sigma^2$$

$$a^2(t)dt^2 - \frac{1}{a^2(t)}d\sigma^2$$

Du global au local: $Gm/r < \varepsilon$ → discontinuités de la gravité

Discontinuité à 5 kpc du centre
qui a piégé $3 \cdot 10^6$ masses solaires
négligeables dans l'univers
conjugué:

Pseudo Trou noir central



$$Gm/r = a(t)$$

→ discontinuité qui descend
dans les puits de potentiel

Discontinuité
aux confins
de la galaxie

Conclusion

- RG et DG OK avec tous les tests
- DG est plus simple et admet des symétries globales
- Anomalies (Pioneer, CMB, Cosmologie) favorisent DG
- OG avec composante longitudinale découverte par Chandra !
- GP-B et WMAP/Planck seront déterminants

Perspectives de test:

- Mission dédiée à l'effet Pioneer à 10^{-12}m/s^2 près
- Test des paramètres PPPN
- Recherche des discontinuités et OGs

L'effet Pioneer et la RG

- Pas de traitement rigoureux de l'influence de l'expansion d'un background sur la dynamique locale.
- Best effort: la solution de Mc Vittie

$$d\tau^2 = \frac{1 - \frac{m}{2ra(t)}}{1 + \frac{m}{2ra(t)}} dt^2 - \left(1 + \frac{m}{2ra(t)}\right)^4 a^2(t) d\sigma^2$$

$r \rightarrow r^* = a(t)r \rightarrow$ Effet d'accélération négligeable lié à l'expansion dans g^*_{0r}

Outlooks (I): From the CMB to large scale structures

- Still quasi stationary cosmology near $t=0$
- Baryonic matter only
- Exponentially growing fluctuations early reach the nonlinear regime
- Raw typical sizes of galaxies (our universe structures) vs universe voids (conjugate universe structures)
- Raw typical visible masses of galaxies

Outlooks (II): No need for dark matter ?

- Universe twice older: 26 billion years
- Oldest galaxies ($z=5$): 17 billion years
- Galaxy creates a void in conjugate universe equivalent to a Halo

La symétrie x/t

- Forme la plus générale de $g_{\mu\nu}$

$$d\tau^2 = C \left[A dx^2 + \frac{1}{A} dt^2 \right]$$

$$d\tilde{\tau}^2 = \frac{1}{C} \left[\frac{1}{A} dx^2 + A dt^2 \right]$$

→ If $A \neq 1$, C viole la symétrie x/t



$$d\tau^2 = A dx^2 + \frac{1}{A} dt^2$$

La symétrie x/t (II)

● Si $A=i$:

$$d\tau^2 = C \left[dx^2 - dt^2 \right]$$

$$d\tilde{\tau}^2 = \frac{1}{C} \left[dx^2 - dt^2 \right]$$

$$d\hat{\tau}^2 = C \left[dt^2 - dx^2 \right]$$

$$d\tilde{\hat{\tau}}^2 = \frac{1}{C} \left[dt^2 - dx^2 \right]$$

→ Symétrie x/t OK



$$d\tau^2 = C \left[dx^2 - dt^2 \right], \hat{g}_{\mu\nu} = -g_{\mu\nu}$$