

IAP, 6 décembre 2005

LE SIÈCLE D' EINSTEIN

Thibault Damour

Institut des Hautes Etudes Scientifiques



EINSTEIN

- INSTAURATEUR DES TROIS RÉVOLUTIONS DE LA PHYSIQUE FONDAMENTALE DU 20^{ÈME} SIÈCLE
 - THÉORIE QUANTIQUE
 - RELATIVITÉ RESTREINTE
 - RELATIVITÉ GÉNÉRALE
 } SOUS-TENDENT LA TECHNOLOGIE MODERNE

- VISIONNAIRE D'UNE UNIFICATION DE LA DESCRIPTION DE LA RÉALITÉ
 - VISION D'UNE GRANDE ACTUALITÉ

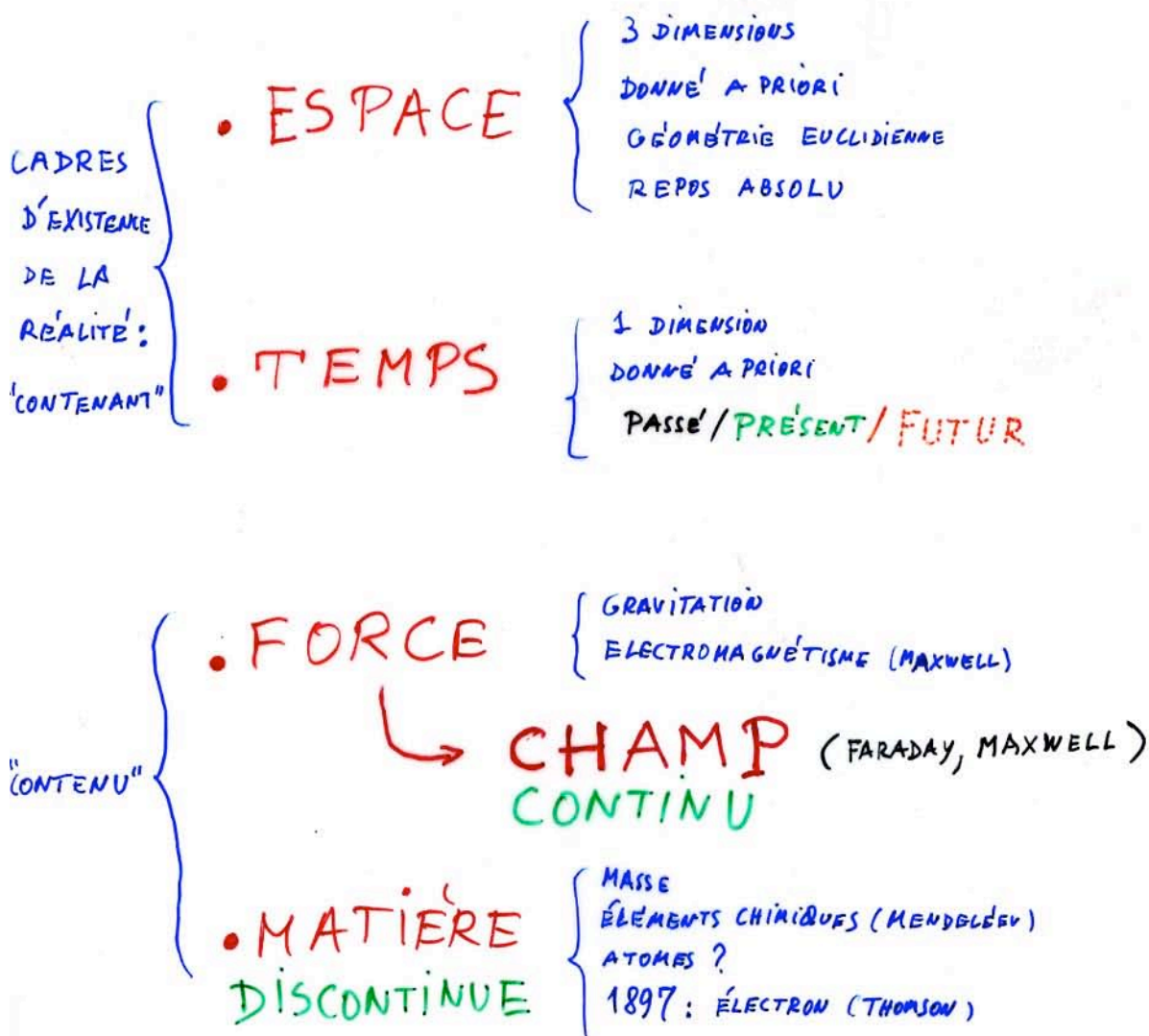
- SCIENTIFIQUE INTÉRESSÉ PAR LE CONTACT AVEC L'EXPÉRIENCE, ET LES APPLICATIONS DE LA SCIENCE

- SAVANT-PHILOSOPHE QUI RÉFLÉCHISSAIT AUX CONSÉQUENCES PHILOSOPHIQUES DE LA SCIENCE

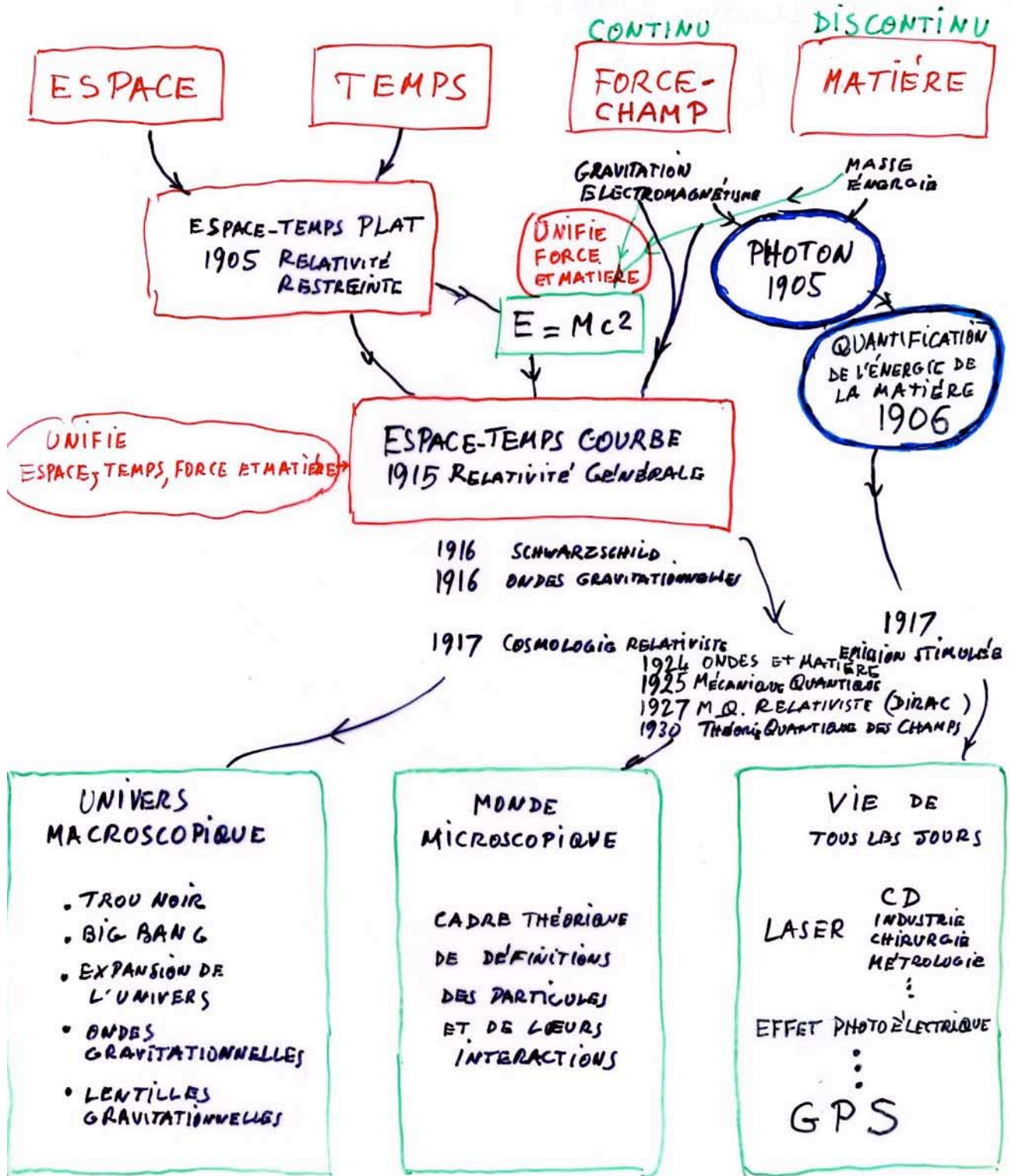
- SAVANT-ENGAGÉ QUI RÉFLÉCHISSAIT AUX CONSÉQUENCES POLITIQUES ET SOCIALES DE LA SCIENCE

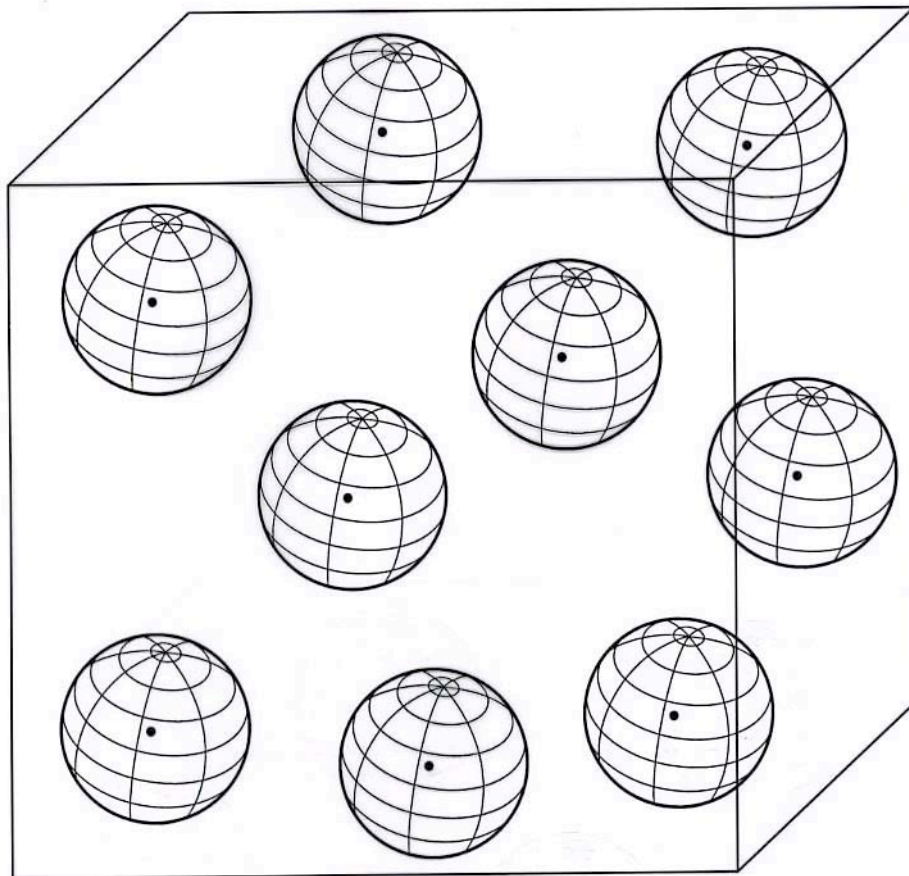
CONCEPTION DE LA RÉALITÉ PHYSIQUE À LA FIN DU 19^{ÈME} SIÈCLE

4 CATÉGORIES SÉPARÉES



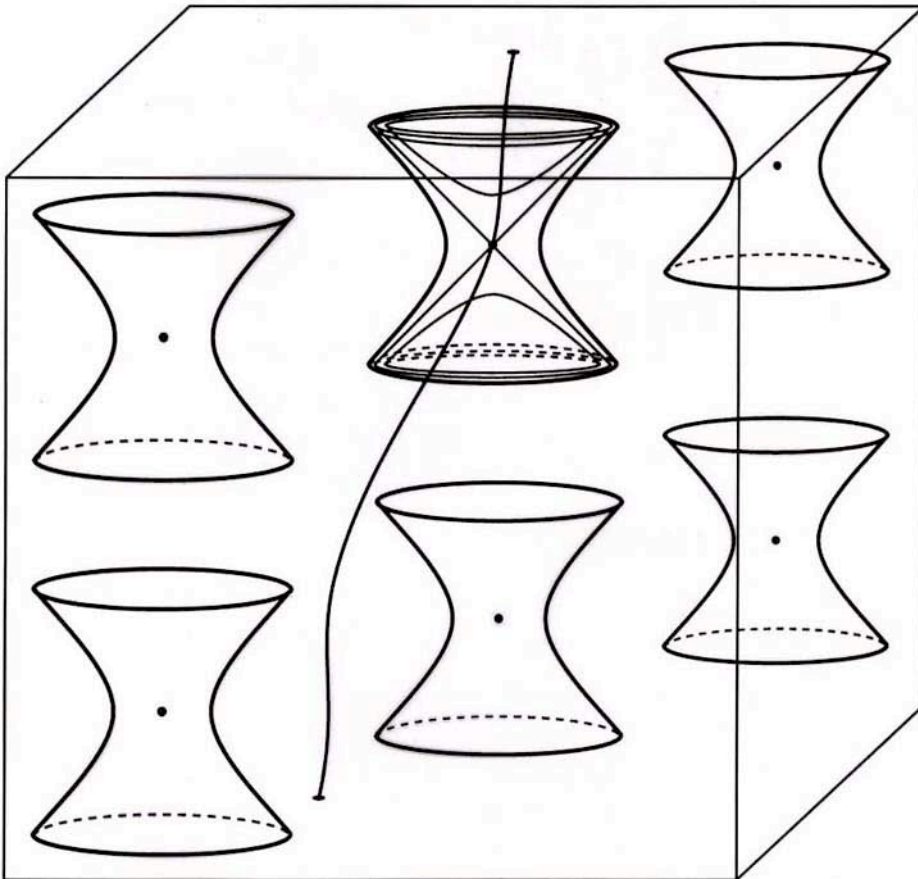
L'HERITAGE D'EINSTEIN

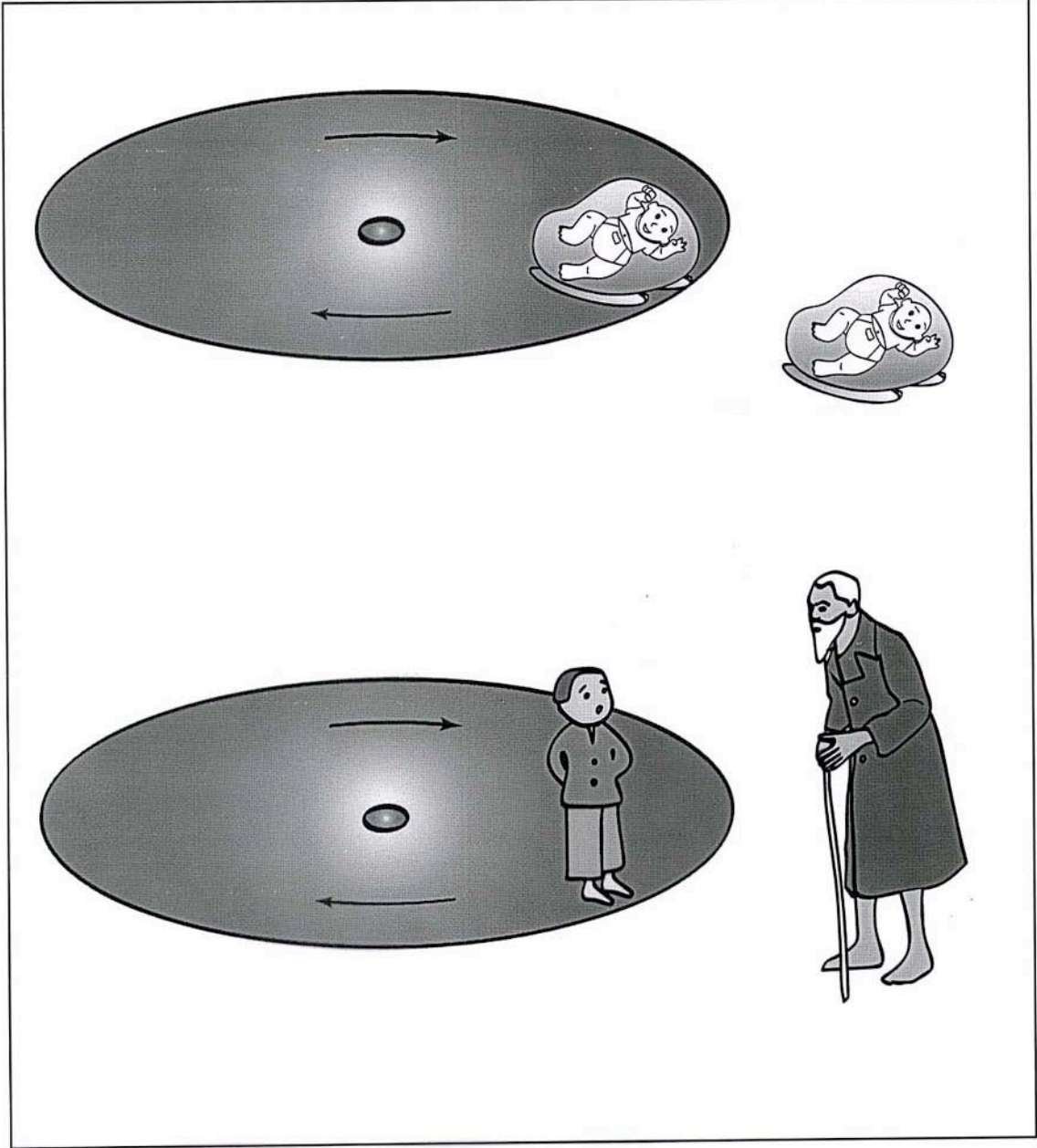




ESPACE-TEMPS "PLAT" (POINCARÉ-MINKOWSKI)

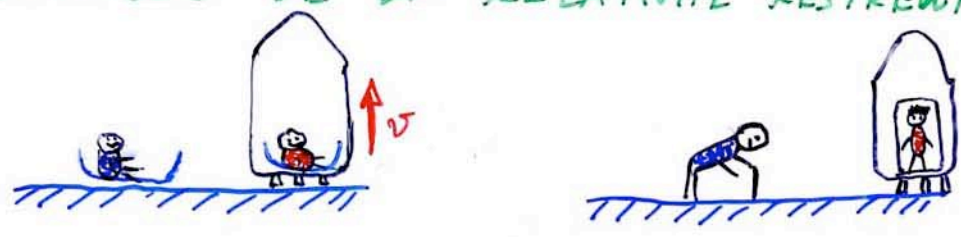
$$\begin{aligned} S^2 &= L^2 - c^2 T^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 - c^2 (\Delta t)^2 \\ &= \eta_{\mu\nu} \Delta x^\mu \Delta x^\nu \end{aligned}$$



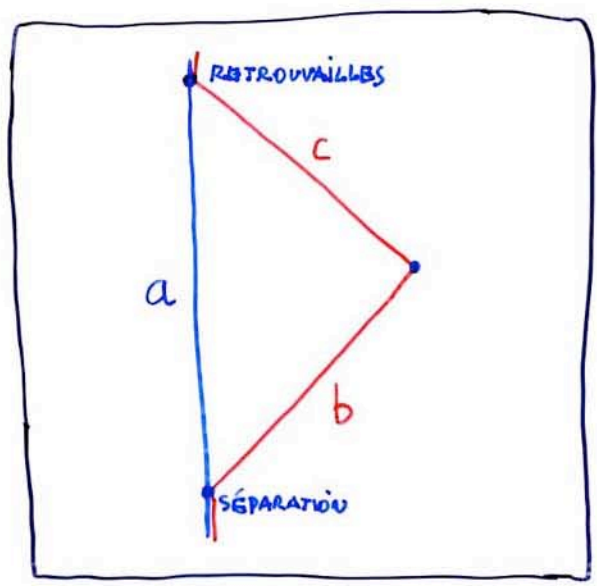
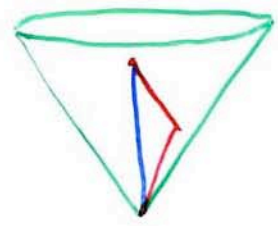


CONSEQUENCES DE LA RELATIVITE RESTREINTE

PARADOXE
DES JUMEAUX



TRIANGLE
D'
ESPACE-TEMPS



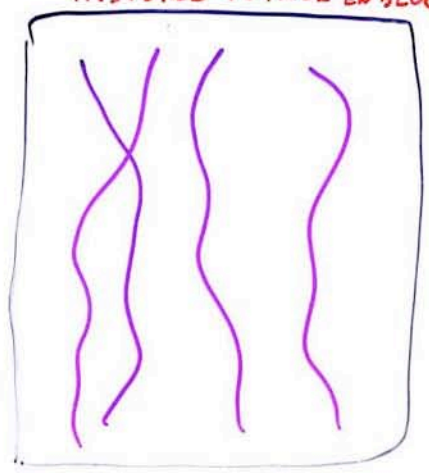
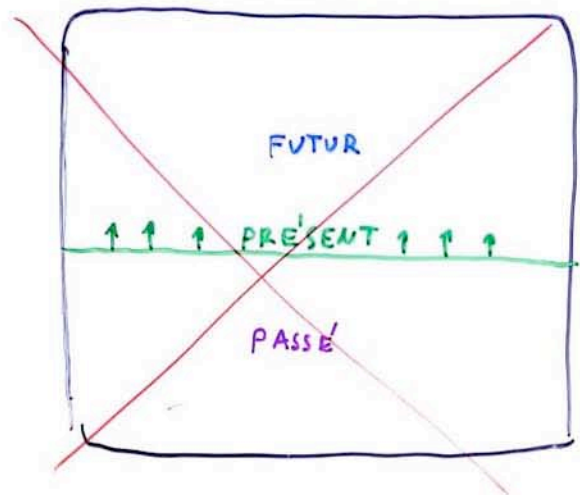
$$a > b + c$$

VERIFIE EXPERIMENTALEMENT

- (MUONS
- (HORLOGES EMBARQUEES

MAIS SURTOUT: DISPARITION DU "PRESENT"

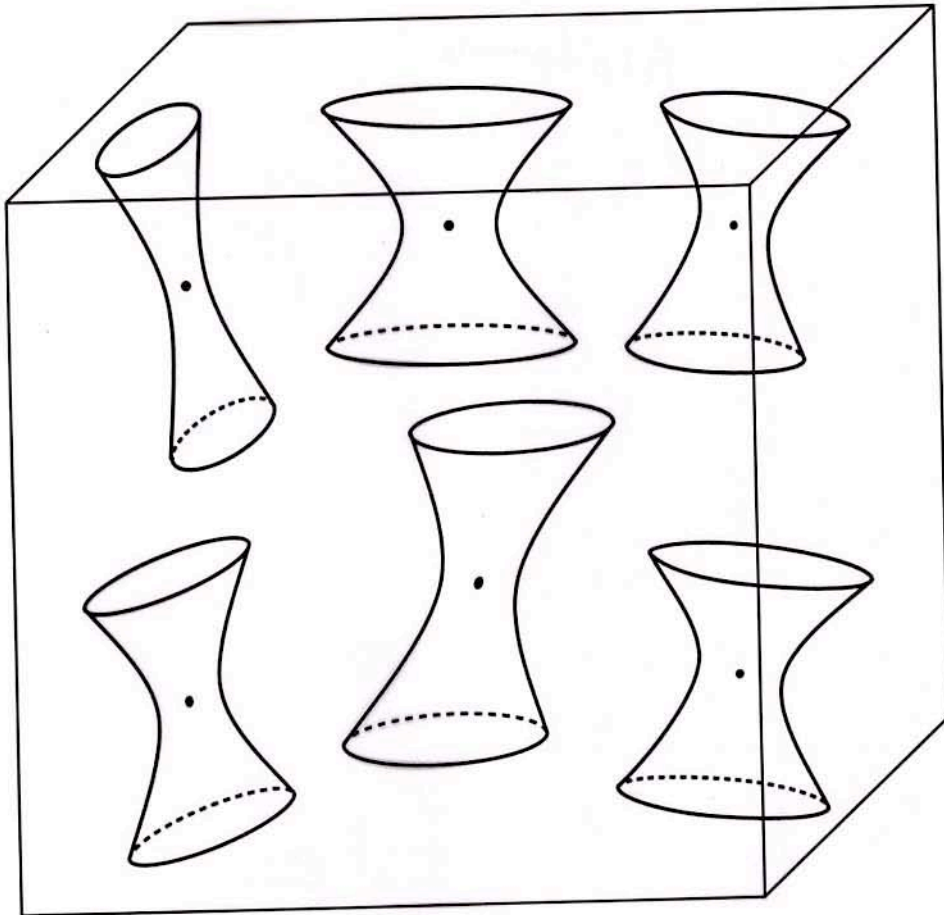
HISTOIRE TOTALE EN BLOC



ESPACE-TEMPS "COURBE" (EINSTEIN 1915)

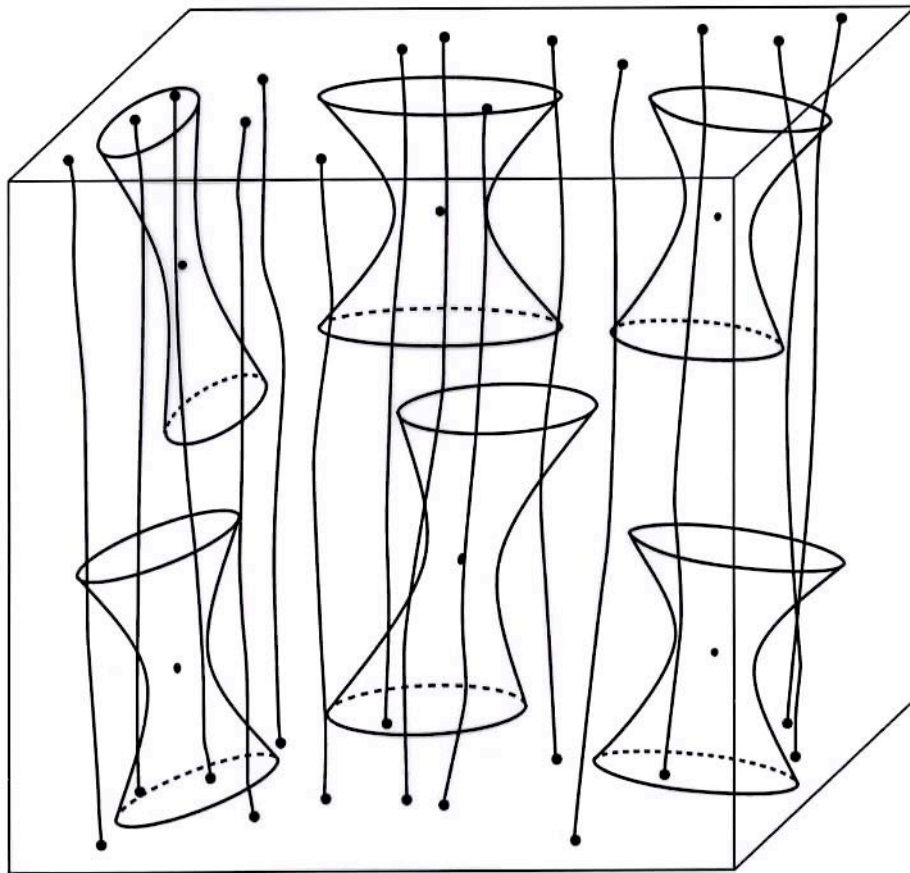
AS

$$ds^2 = dl^2 - c^2 dt^2 = g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu$$

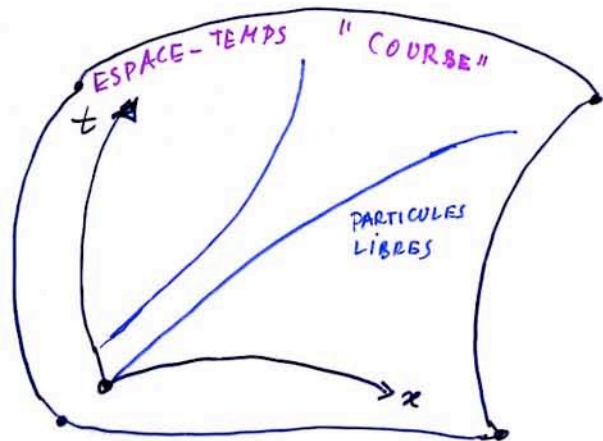
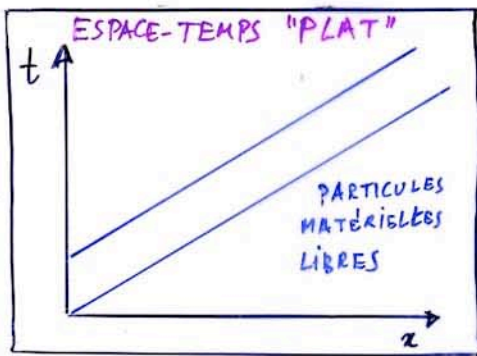


EQUATIONS D'EINSTEIN

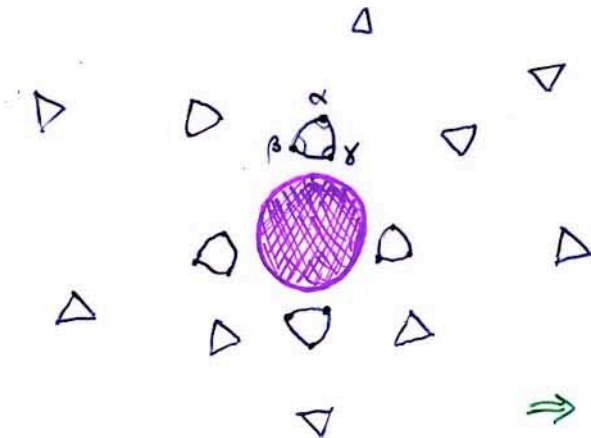
$$R_{\mu\nu}(g) - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



GÉOMÉTRIE = GRAVITATION



LA MATIÈRE COURBE L'ESPACE-TEMPS



COURBURE

$$C = \frac{\alpha + \beta + \gamma - \pi}{\text{AIRE}} \approx \frac{GM}{c^2 R^3}$$



$$\alpha + \beta + \gamma - \pi \approx \frac{GM}{c^2 R} \sim \begin{cases} 10^{-9} \oplus \\ 10^{-6} \odot \\ 0.2 \bullet \text{ * A' NEUTRON} \end{cases}$$

ÉQ. EINSTEIN

$$C = \frac{\alpha + \beta + \gamma - \pi}{\text{AIRE}}$$



COURBURE (SECTIONNELLE)
MOYENNISÉE SUR LES DIRECTIONS
DU TRIANGLE SPATIAL CONSIDÉRÉ

$$\langle C \rangle_{\text{DIRECTIONS DANS L'ESPACE}} = \frac{8\pi G}{3c^2} \rho$$

DENSITÉ VOLUMIQUE
DE MASSE-ÉNERGIE

EXPERIMENTAL TESTS OF S.R.

B8

A SAMPLE OF MODERN RESULTS

- Brillet, Hall '79: LASER VERSION OF Michelson-Morley expt

INTERPRETED IN TERMS OF ANISOTROPY IN c_{LIGHT} :

$$\left| \frac{\delta c}{c} \right| < 2.5 \times 10^{-15}$$

- Bear et al. '00: bounds on sidereal variations (as the Earth rotates) in the relative Larmor frequencies of co-located ^3He and ^{129}Xe masers operating on nuclear spin- $\frac{1}{2}$ Zeeman transitions ($\nu_{\text{He}} \sim 4.9 \text{ kHz}$)

$$\delta \nu_{\text{He}} = \delta \nu_x \cos \Omega_s t + \delta \nu_y \sin \Omega_s t : \sqrt{\delta \nu_x^2 + \delta \nu_y^2} = 53 \pm 45 \text{ mHz}$$

INTERPRETED IN TERMS OF PRETZ-VIOLATING COUPLING OF neutron

$$\hat{b}_J = \frac{b_J}{m_n} - d_{JO} + \frac{1}{2} \epsilon_{JKL} g_{KLO} - \frac{1}{2} \epsilon_{JKL} \frac{h_{KLO}}{m_n}$$

$$|\hat{b}_J^\perp| = (4.0 \pm 3.3) \times 10^{-31}$$

- Jacobson, Liberati, Mattingly '03 '05: absence of vacuum Cerenkov effect for highest observed ultra-high energy cosmic rays

INTERPRETED IN TERMS OF MODIFIED DISPERSION RELATIONS

$$E^2 = m^2 + p^2 + f^{(3)} \frac{p^3}{M_{\text{Pl}}} + f^{(4)} \frac{p^4}{M_{\text{Pl}}^2}$$

$$\left| f_p^{(3)} - f_\gamma^{(3)} \right| \lesssim 10^{-14}$$

$$\left| f_p^{(4)} - f_\gamma^{(4)} \right| \lesssim 10^{-5}$$

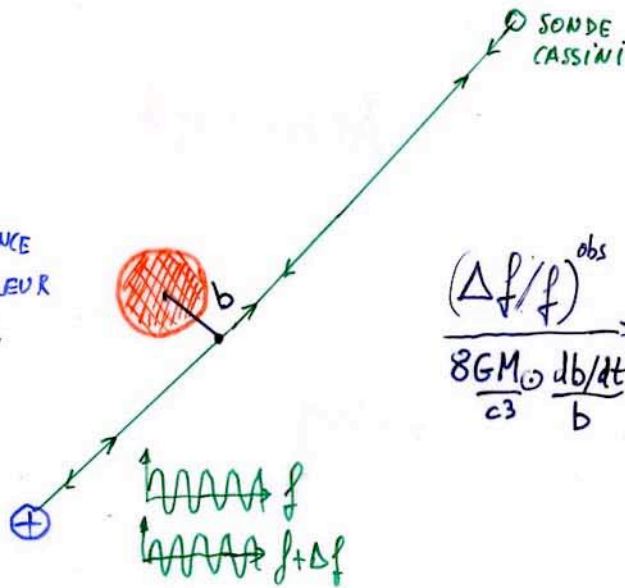
QUELQUES TESTS EXPERIMENTAUX DE LA RELAT. GENERALE

UNIVERSALITE' DE LA CHUTE LIBRE



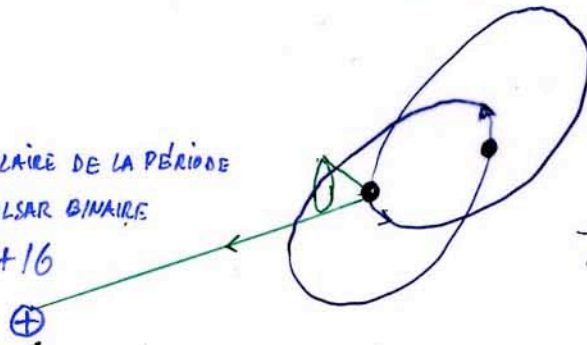
$$\left(\frac{\Delta a}{a}\right)_{BeCu} = (-1.9 \pm 2.5) \times 10^{-12}$$

CHANGEMENT DE FREQUENCE D'ONDES RADIO, CAUSE PAR LEUR PASSAGE PRES DU SOLEIL (CASSINI, 2003)



$$\frac{(\Delta f/f)^{obs}}{\frac{8GM_{\odot}}{c^3} \frac{db/dt}{b}} = 1 + (1.0 \pm 1.1) \times 10^{-5}$$

CHANGEMENT SECLAIRE DE LA PERIODE ORBITALE DU PULSAR BINAIRE PSR 1913+16



$$\frac{\dot{P}_b^{obs} - \dot{P}_b^{gal}}{\dot{P}_b^{RG}[\dot{\omega}^{obs}, \gamma_0^b]} = 1.0013 \pm 0.0021$$

$$\dot{P}_b \approx -70 \text{ milliardième de s / orbite}$$

THÉORIE QUANTIQUE

ANCK 1900

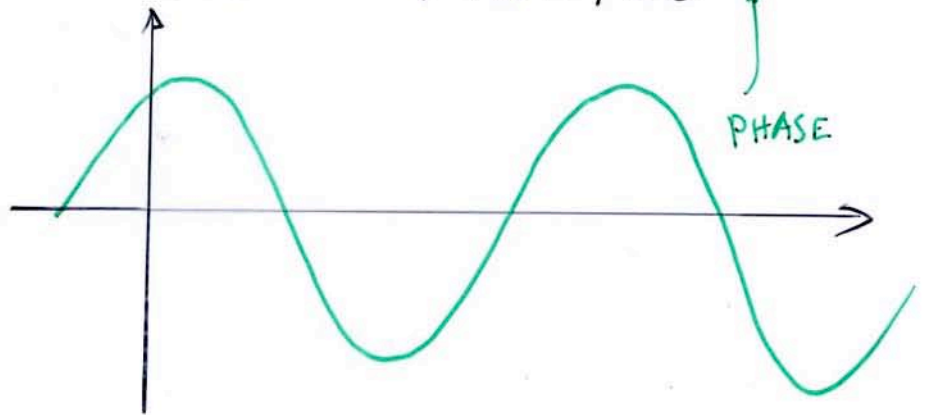
INSTEIN 1905
1906

$$E = h f$$

ENERGIE

"OSCILLATION" $\cos \varphi + i \sin \varphi = e^{i\varphi}$

PHASE



LÖDINGER

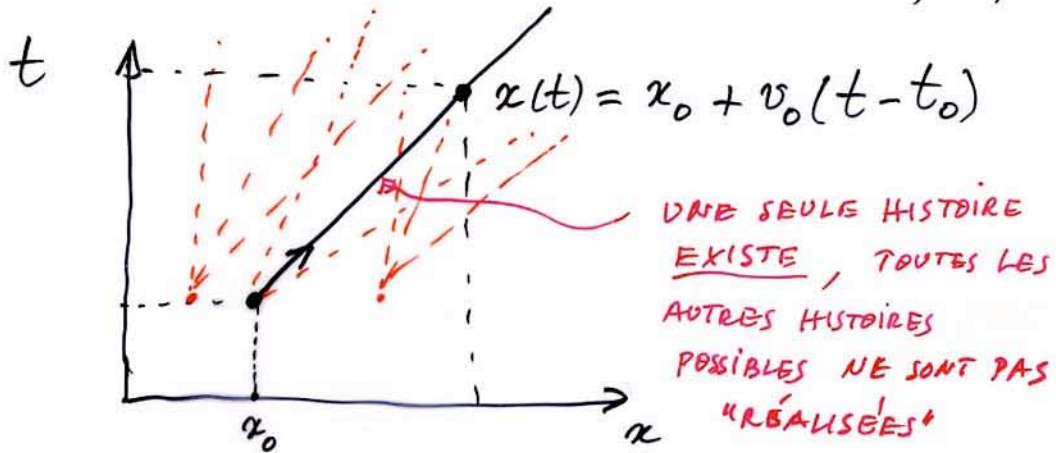
RAC

INMAN

$$\varphi^{\text{histoire}} = 2\pi \int_H dt f = \frac{2\pi}{h} \int_H dt (E_{\text{CINÉTIQUE}} - E_{\text{POTENTIELLE}})$$

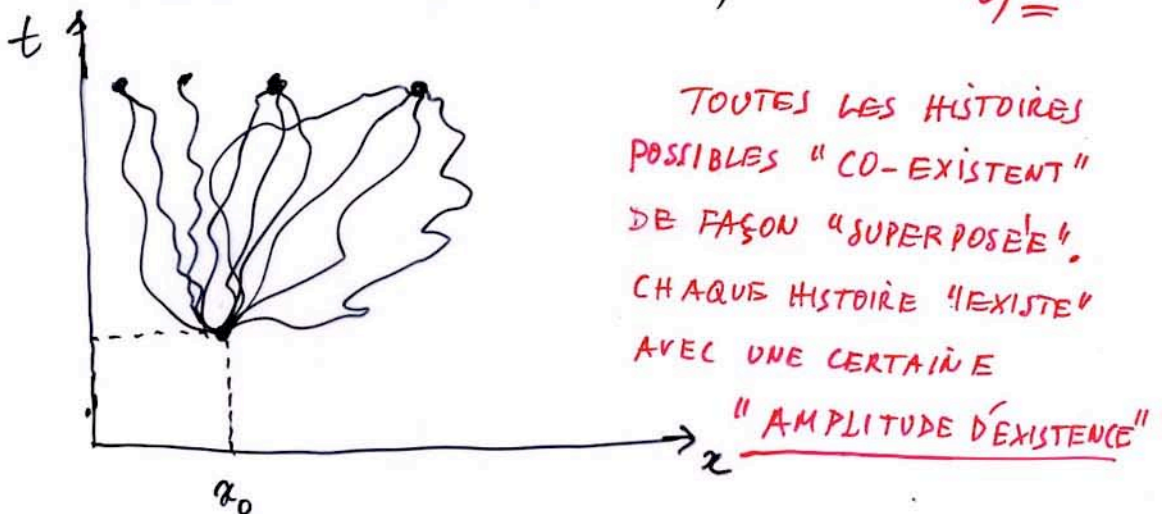
THÉORIE CLASSIQUE :

PAR EX: MOUVEMENT ^{LIBRE} D'UNE PARTICULE, À PARTIR DE t_0, x_0, v_0



THÉORIE QUANTIQUE :

MOUVEMENTS POSSIBLES D'UNE PARTICULE, À PARTIR DE t_0, x_0



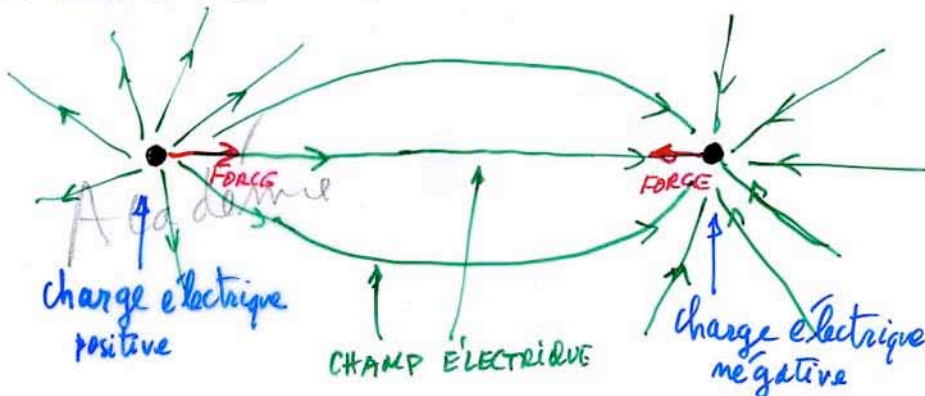
- DÉCRIRE L'AMPLITUDE D'EXISTENCE DE CHAQUE HISTOIRE
- EXPLIQUER POURQUOI LE BROUILLAMINI D'HISTOIRES SUPERPOSÉES PEUT NOUS APPARAÎTRE COMME NE CONTENANT QU'UNE SEULE HISTOIRE APPAREMMENT RÉALISÉE

CHAMP QUANTIQUE

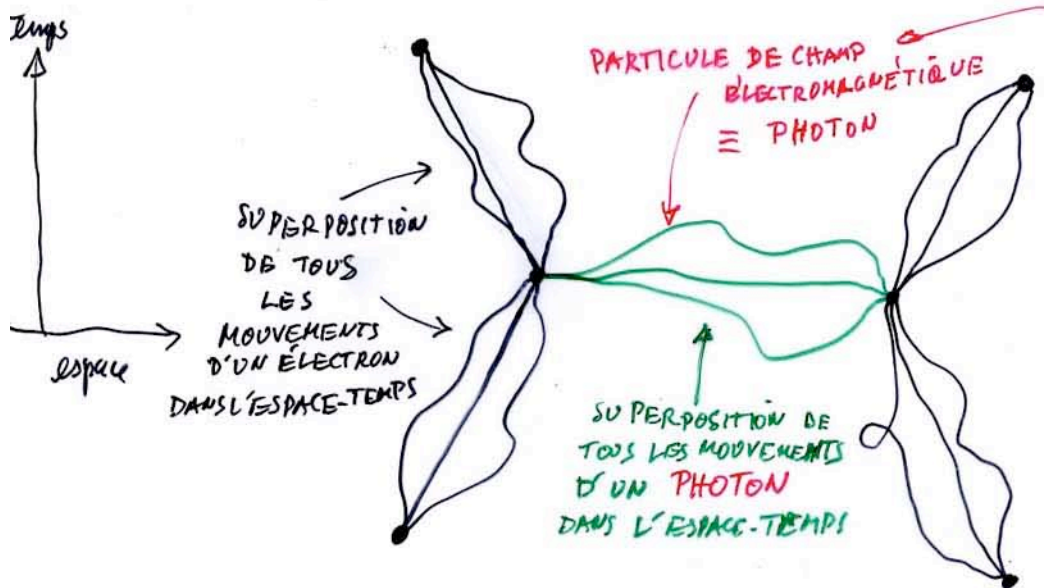
A8

FORCE = CHAMP = PARTICULE = MATIÈRE

FORCE CLASSIQUE = CHAMP



FORCE QUANTIQUE = CHAMP QUANTIQUE = PARTICULE QUANTIQUE



EINSTEIN 1905
 $E_{\text{PHOTON}} = h f$
 ASSOCIÉ À CHAMP ÉLECTRIQUE
 $E \cos 2\pi f t$

FORCE QUANTIQUE \approx MATIÈRE QUANTIQUE
 (INTERACTION) (PARTICULE)

PHYSIQUE ET PHILOSOPHIE

- Maurice Merleau-Ponty (voir JM Lévy-Leblond "Aux Contraires")
(citant London et Bauer)
«... le sens de la physique est de nous faire faire des "découvertes philosophiques négatives" en montrant que "certaines affirmations qui prétendent à une validité philosophique n'en ont pas en vérité." ... La physique détruit certains préjugés de la pensée philosophique et de la pensée non philosophique sans pourtant être une philosophie»

- Mais, on peut aussi parler de la connaissance scientifique pour suggérer des "découvertes philosophiques positives"
Kant : Crit. Raison Pure (1787, 2^{ème} éd, Préface)

« On a admis jusqu'ici que toutes nos connaissances devaient se régler sur les objets; [...].
Que l'on cherche donc une fois si nous ne serions pas plus heureux dans les problèmes de métaphysique en supposant que
les objets se règlent sur notre connaissance, [...] »

HEIDEGGER : « Qu'est-ce qu'une chose ? »

Réalité \leftrightarrow Res = Chose = Objet

Réalité = Objectivité \neq Effectivité

KANT + HEIDEGGER :

La Réalité se règle sur notre Connaissance

↑

Formalisme logico-mathématique

"
Théorie physique

autrement dit

C'est la Théorie qui définit la Réalité

Le temps n'existe pas. (EINSTEIN.)



— C'est sûrement du beau temps
qu'Einstein veut parler.

AVRIL 1922
EINSTEIN À PARIS

"LE TEMPS N'EXISTE PAS"

DÉBAT EINSTEIN - BERGSON

"ESPACE-TEMPS ⇒
ILLUSION DE L'ÉCOULEMENT"

EINSTEIN 1955

"POUR NOUS, PHYSICIENS DANS L'ÂME,
LA DISTINCTION ENTRE LE PASSÉ,
LE PRÉSENT ET LE FUTUR NE GARDE
QUE LA VALEUR D'UNE ILLUSION,
SI TENACE SOIT-ELLE."

"SEUL L'INSTANT PRÉSENT, PERÇU
DANS UNE MOUVANCE ÉTERNELLE
EST RÉEL"

ET PROUST

"NOTRE VRAI MOI EST AFFRANCHI
DE L'ORDRE DU TEMPS" ET PEUT AVOIR ACCÈS À
« L'ESSENCE PERMANENTE ET HABITUELLEMENT
CACHÉE DES CHOSES. »

DÉ 1921 P. à A. de GUICHE: « QUE J'AIMERAIS VOUS PARLER D'EINSTEIN!
ON A BEAU M'ÉCRIRE QUE JE DÉRIVE DE LUI, OU LUI DE MOI, ... »

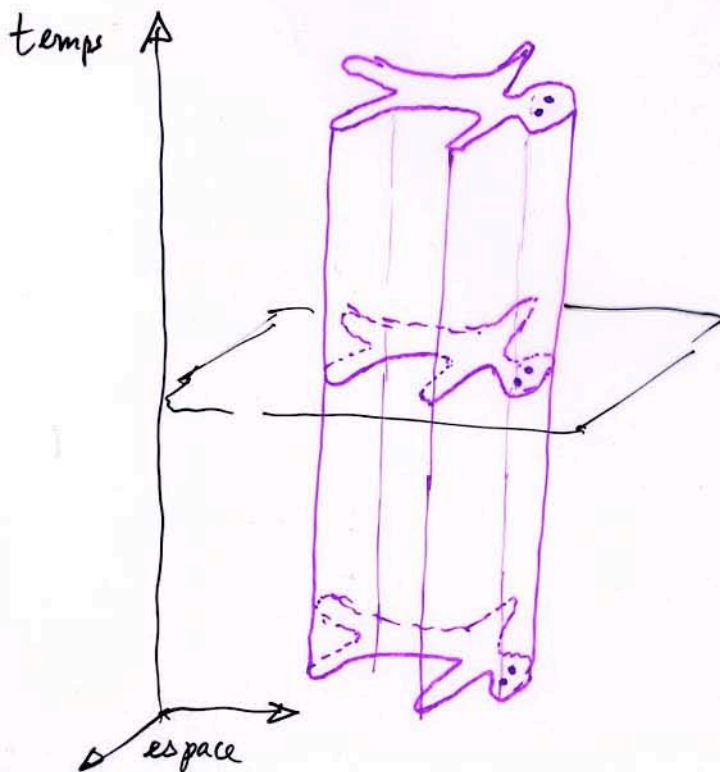
« EINSTEINISONS - LE ! »

«...À CAUSE DE LA FORME APLATIE QUE PRENNENT NOS
ÊTRES EN RÉVOLUTION DANS LE TEMPS. »

PROUST

LE TEMPS "PERDU" ET "RETROUVÉ"

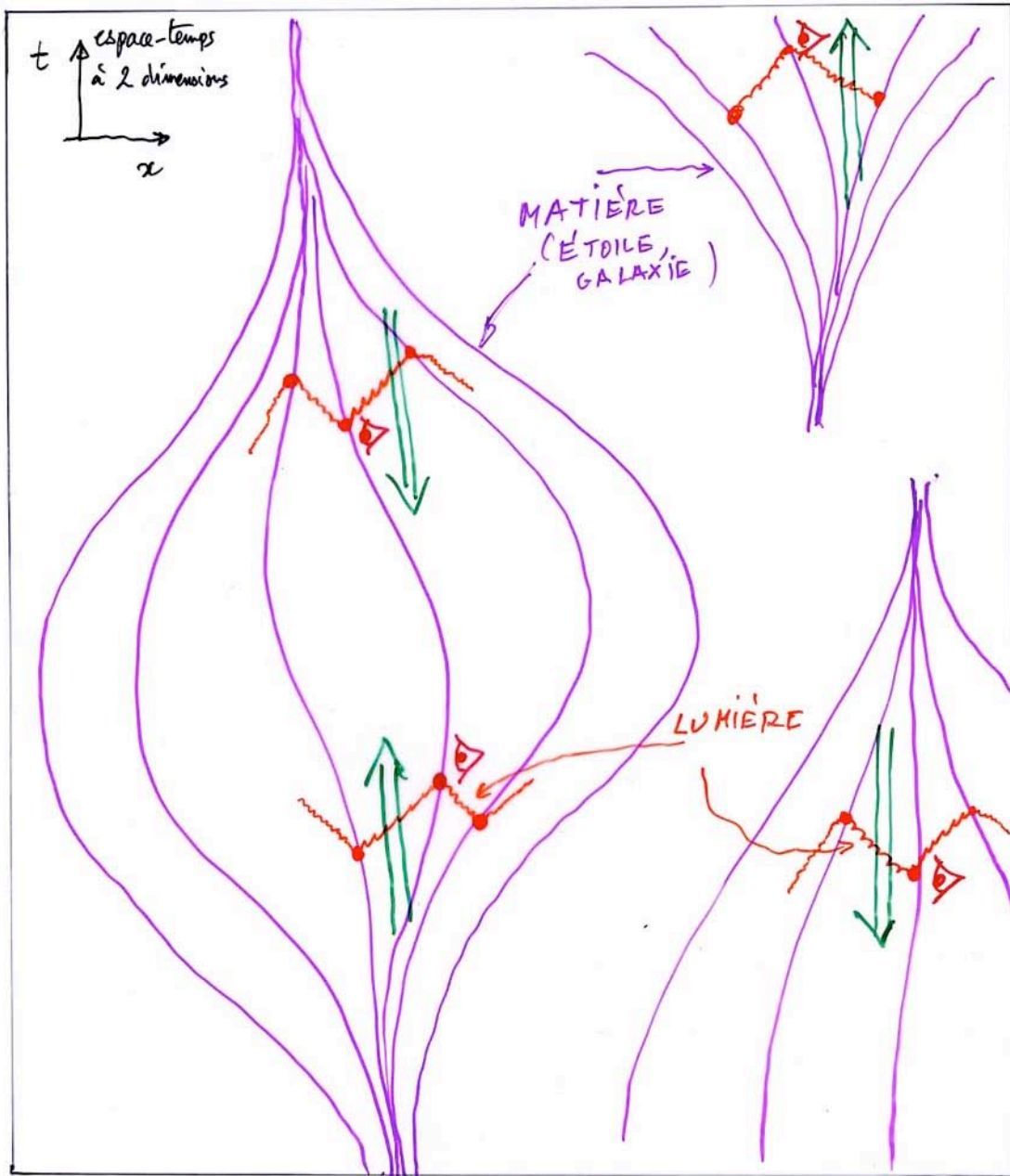
... "comme si les hommes étaient guchés sur de vivantes échasses grandissant sans cesse, parfois plus hautes que des clochers, ... et j'y décrirais les hommes, cela dût-il les faire ressembler à des êtres monstrueux, comme occupant dans le **Temps** une place autrement considérable que celle si restreinte qui leur est réservée dans l'**espace**, une place, au contraire, prolongée sans mesure, puisqu'ils touchent simultanément, comme des géants, plongés dans les années, à des époques vécues par eux, si distantes, — entre lesquelles tant de jours sont venus se placer — dans le **Temps**."

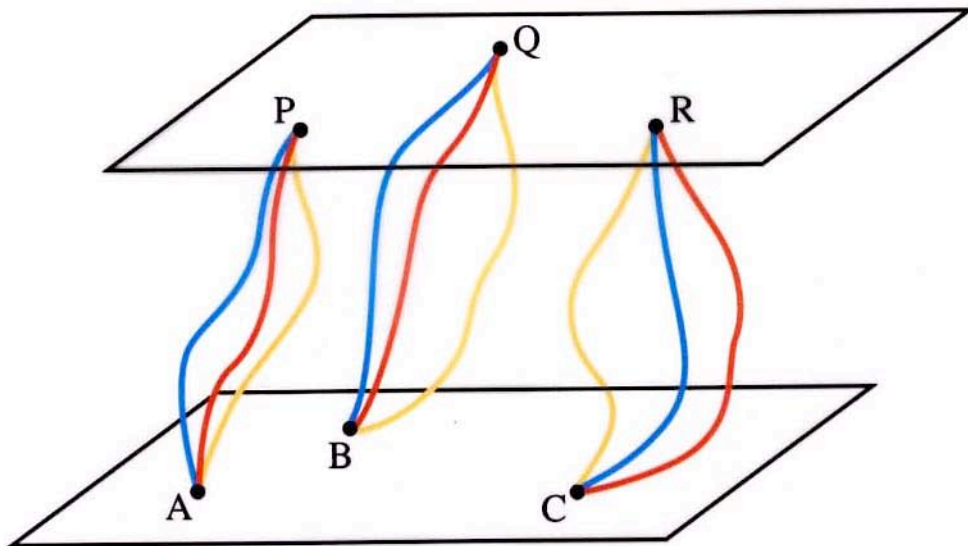
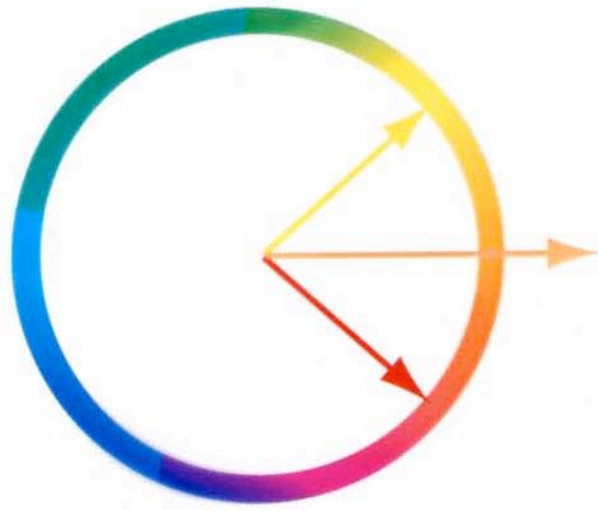


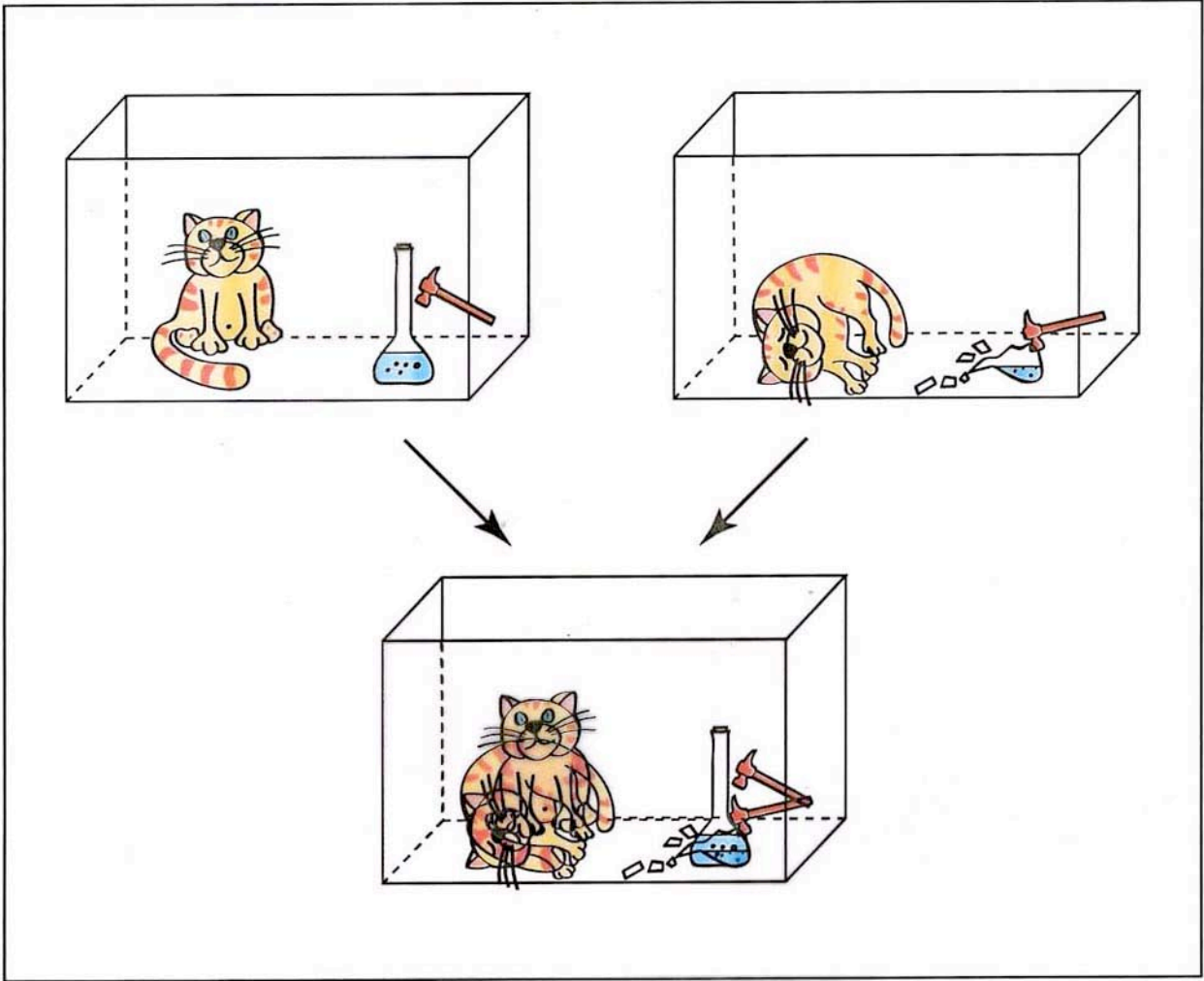
ESPACE-TEMPS ET ILLUSION DE L'ÉCOULEMENT DU TEMPS

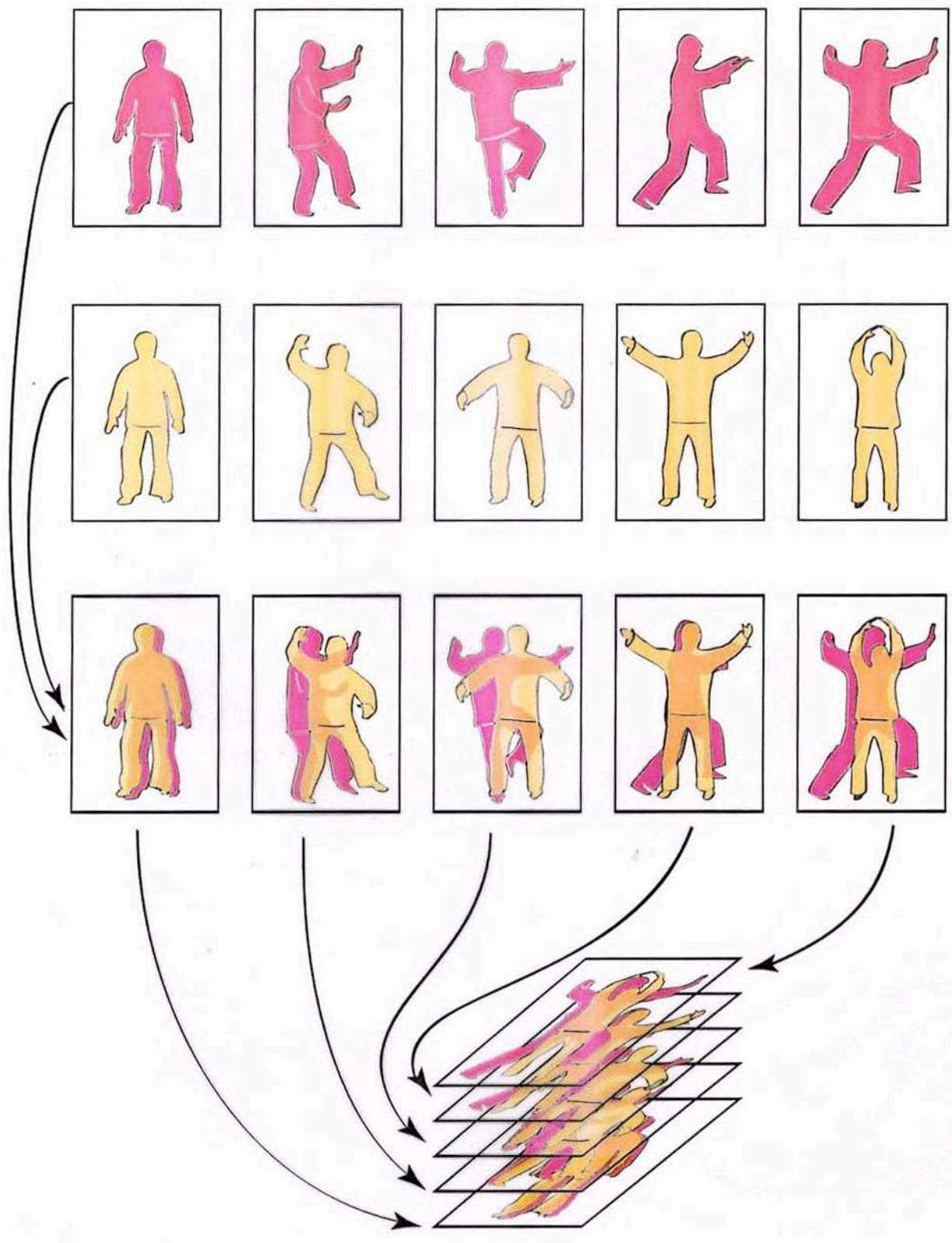
ESPACE-TEMPS CONCEVABLE

"FLÈCHES DU TEMPS LOCALES" 









EN RÉSUMÉ

49

RELATIVITÉ RESTREINTE \rightarrow ESPACE = TEMPS

RELATIVITÉ GÉNÉRALE \rightarrow ESPACE = TEMPS = FORCE GRAVITATIONNELLE

MÉCANIQUE QUANTIQUE DES CHAMPS \rightarrow FORCE = MATIÈRE
ET CONTINU = DISCONTINU

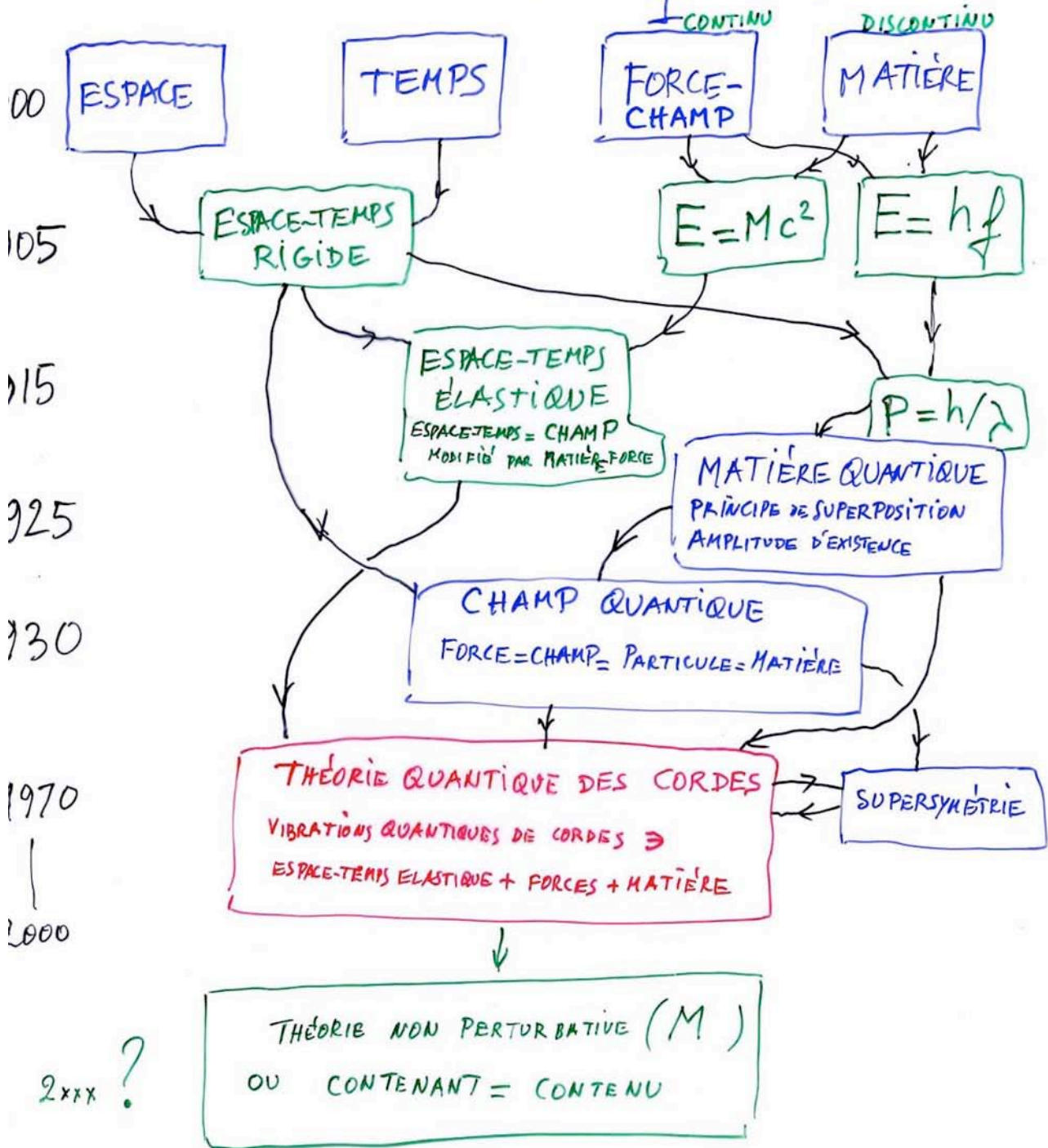
PEUX-T-ON EN CONCLURE QUE :

ESPACE = TEMPS = FORCE = MATIÈRE

?

EVOLUTION DE LA Φ DU 20^{ÈME} SIÈCLE

ALY



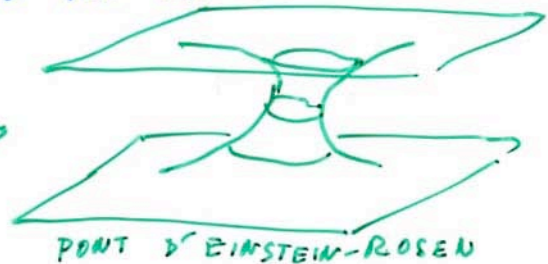
UN DÉFI POUR LE 21^{ÈME} SIÈCLE

LES VISIONS D'EINSTEIN

- UNIFIER GRAVITATION ET ÉLECTROMAGNÉTISME

- UNIFIER CONTINU ET DISCONTINU VIA LA GRAVITÉ

PARTICULE PONCTUELLE



- UNIFIER CLASSIQUE ET QUANTIQUE

- ET MÊME EINSTEIN 1954

« Il y a beaucoup de raisons pour être attiré vers une théorie qui ne contient ni espace, ni temps.

Mais personne ne sait comment construire une telle théorie. »

THÉORIE DES CORDES

DEPUIS 2000 ANS : "DES ATOMES ET DU VIDE"

DANS L'ESPACE



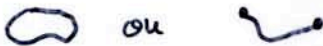
DANS L'ESPACE-TEMPS



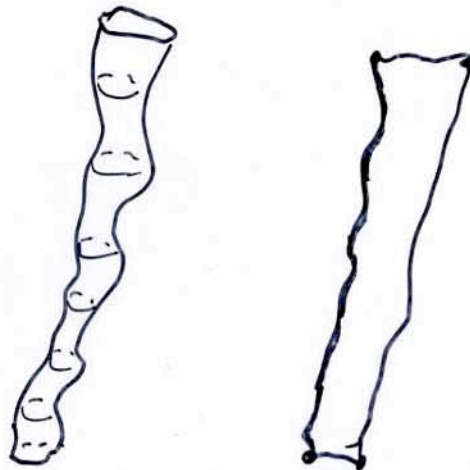
CORDES

(VENEZIANO, ..., NAMBU, ..., NEVEU, SCHWARZ, RAMOND, SCHERK, ...;
GREEN-SCHWARZ, ..., POLYAKOV, ..., GROSS, ..., POLCHINSKI, TOWNSEND, ...)

DANS L'ESPACE



DANS L'ESPACE-TEMPS

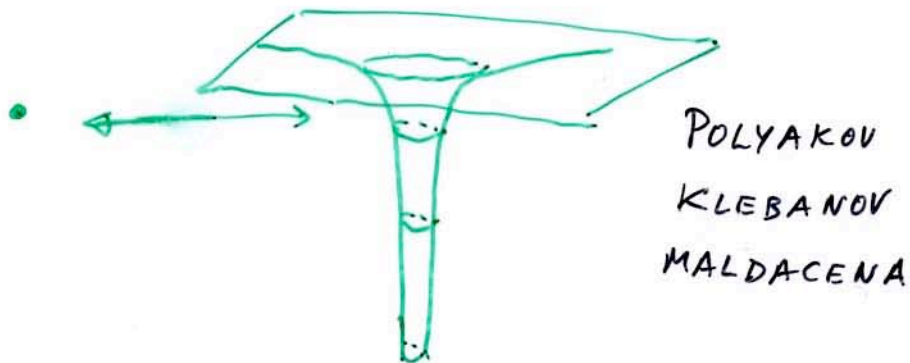


THÉORIE DES CORDES

- UNIFICATION PROFONDE ENTRE GRAVITATION ET TH. JAUGE

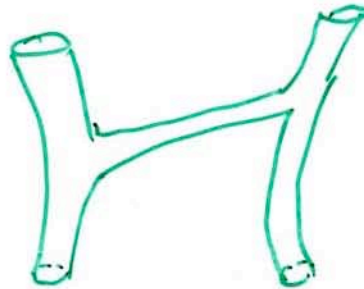


- EQUIVALENCE ENTRE "PARTICULES (BRANES)" ET ESPACE-TEMPS RÉGULIER COURBÉ



- CETTE EQUIVALENCE \Rightarrow EQUIV. ENTRE RÉGIME QUANTIQUE ET RÉGIME CLASSIQUE

- CORDE = MATIÈRE = FORCE = ESPACE-TEMPS



\Rightarrow PROBABLEMENT ESPACE-TEMPS = "ILLUSION"

= STRUCTURE ÉMERGENTE

CONTENANT = CONTENU

AU DELÀ D'EINSTEIN ?

- "NUAGES NOIRS"

MATIÈRE NOIRE

ÉNERGIE NOIRE

HIERARCHIES

- LA TH. DES CORDES ALLIE THÉORIE QUANTIQUE ET RELAT. GÉNÉRALE

MAIS PROBLÈMES CONCEPTUELS : CONTENU = CONTENANT
ESPACE-TEMPS ÉMERGENT ?

ET PROBLÈME DU LIEN AVEC LA RÉALITÉ ?

- BESOIN DE DONNÉES EXPÉRIMENTALES :

$$\rho_V \sim 10^{-29} \text{ g/cm}^3 \sim 10^{-120} m_{\text{PLANCK}}^4 \quad ?$$

LARGE HADRON COLLIDER

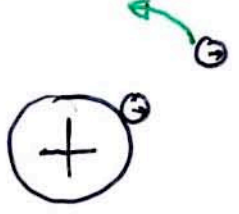
TESTS SATELLITAIRES DU PRINCIPLE D'ÉQUIVALENCE

ONDES GRAVITATIONNELLES

...

PHYSIQUE MODERNE (CAD PHYSIQUE EINSTEINIENNE) ET VIE QUOTIDIENNE

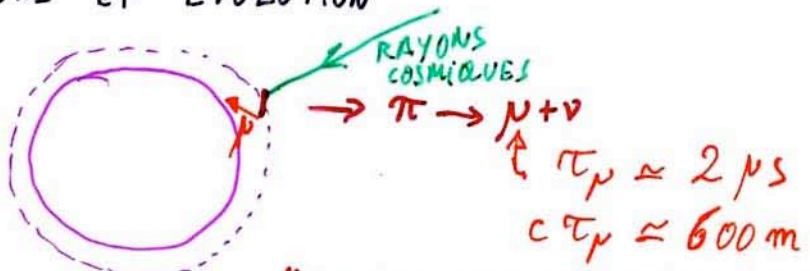
- LASER (EINSTEIN 1917 : "principe du laser")
- EFFET PHOTOELECTRIQUE (EINSTEIN 1905: loi fondamentale $E_{cin} = hf - W$)
- e^- DANS TUBE CATHODIQUE TV : $v \sim \frac{1}{3}c$: dynamique relativiste, Einstein 1905
- TOMOGRAPHIE PAR EMISSION DE POSITRONS : $E = mc^2$, $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ Einstein 1905
- SYSTEME DE POSITIONNEMENT GLOBAL PAR SATELLITES (GPS)



Relativité Restreinte: - 5 ms / minute
Relativité Générale: + 32 ms / minute

15 m \leftrightarrow 50 ms
↑ ATTEINT APRES 1 minute 1/2

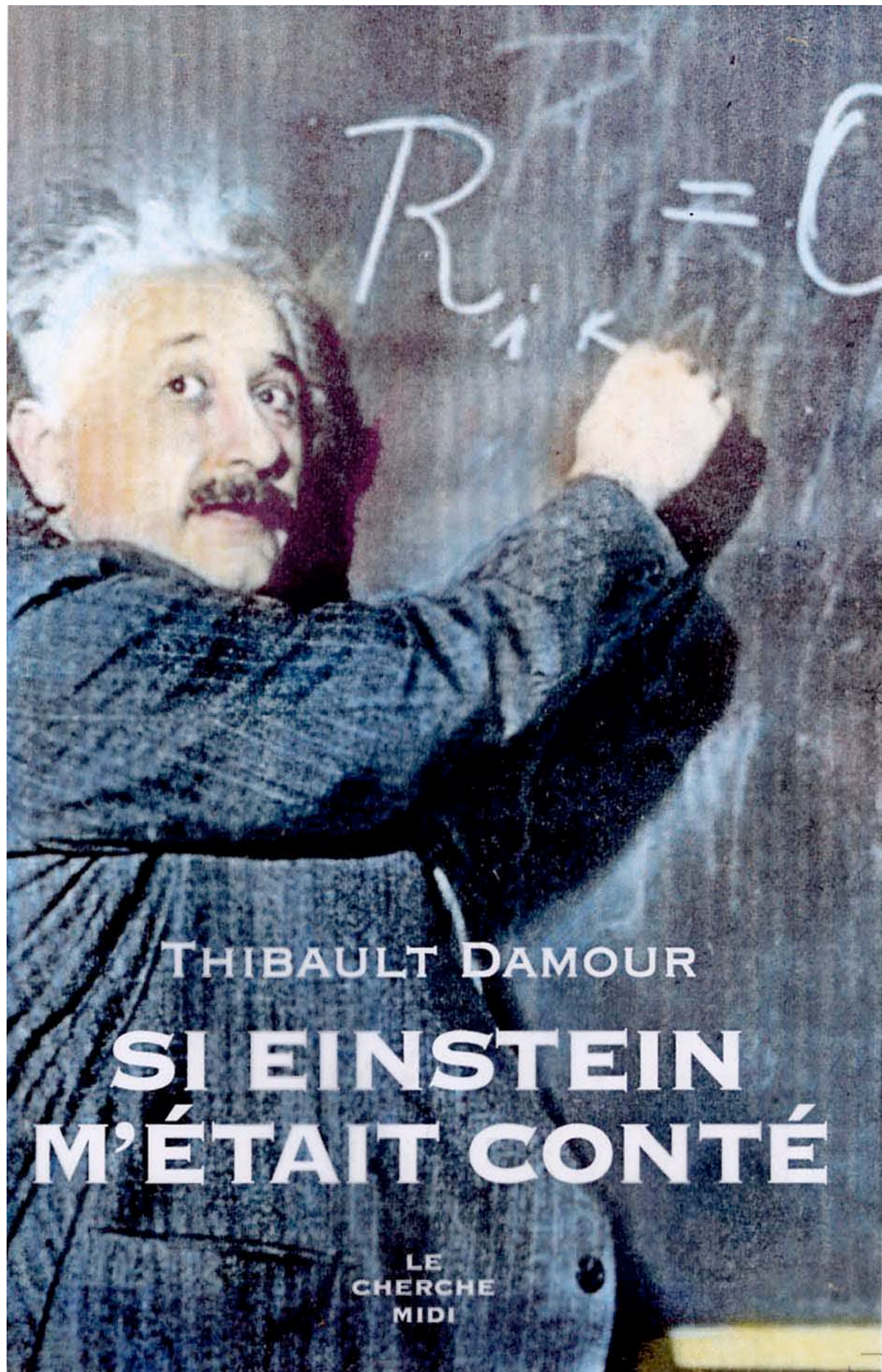
● MUONS ET ÉVOLUTION



« PARADOXE DES JUMEAUX » CRUCIAL POUR QUE LES μ ATTEIGNENT LE SOL ET PUISSENT ÉVENTUELLEMENT PROVOQUER DES MUTATIONS DE L'ADN

•
•
•

- FABRICATION DU FROMAGE : MOUVEMENT BROWNIEN DE PARTICULES COLLOIDALES EINSTEIN 1905



THIBAUT DAMOUR

SI EINSTEIN M'ÉTAIT CONTÉ

LE
CHERCHE
MIDI