

Quelle physique théorique pour les astroparticules?*

Pierre Binétruy, APC



Journée de la division Champs et Particules, SFP, 16 mai 2009

* dédié à Alain de Bellefon

La physique des astroparticules est en partie définie
comme un champ expérimental.

Un peu d'histoire...

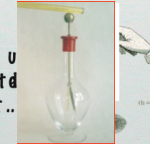
L'Aventure cosmique

10



En 1909, le chanoine Wurtz qui avait développé un électroscope ultrasensible l'installa en haut de la Tour Eiffel...

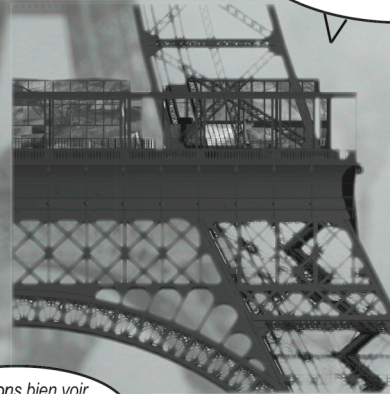
Les laboratoires de physiciens au début du siècle, les électroscopes se chargeaient de façon inexpliquée pendant la nuit.



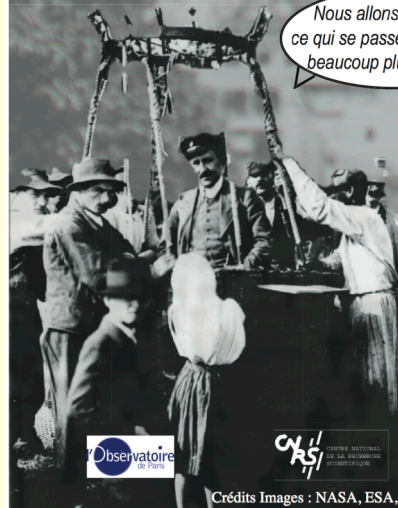
E p

Si nos appareils se déchargent pendant la nuit, c'est sans doute à cause d'un rayonnement venant du sol : en montant, par exemple en haut de la Tour Eiffel, le phénomène devrait alors s'atténuer...

En 1909, un physicien allemand, le Dr. Wurtz (1864-1930), qui avait développé un électroscope ultrasensible, l'installa en haut de la Tour Eiffel. Il constata alors que la diminution du taux de charge de son électroscope était moindre que prévu si tout l'effet ionisant était dû à un rayonnement uniquement d'origine terrestre.



Nous allons bien voir ce qui se passe en montant beaucoup plus haut !



Le physicien autrichien Franz-Victor Hess (1894-1964) se pencha alors que seule une expérience lors d'une ascension en ballon permittrait d'en savoir plus sur l'origine de ces rayonnements. De 1911 à 1913, Hess effectua dix ascensions à bord d'une nacelle portée par ballon. Son appareillage scientifique : des électroscopes du type de celui développé par Wulf mais modifié pour être insensible à la baisse de pression atmosphérique et à la chute empêchée par l'altitude.



Qu'est-ce que sont les astroparticules?



CERN : le laboratoire où les conditions de l'Univers juste après le big bang sont reproduites

Première définition des astroparticules

Astroparticule = Particule Cosmique

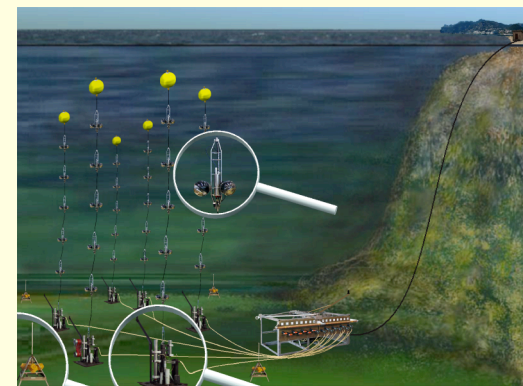
Les astroparticules sont les particules cosmiques :

Gammas de haute énergie



Rayons cosmiques

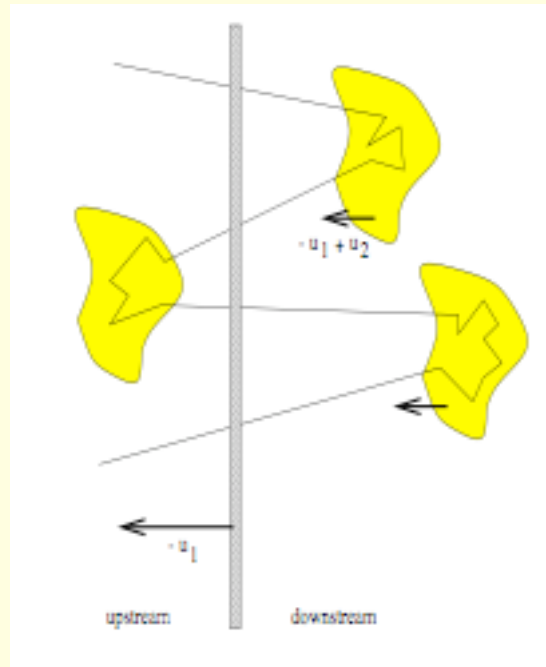
Neutrinos



Théorie associée:

- Propagation des rayons cosmiques

- Mécanismes d'accélération (mécanisme de Fermi)



- Sources (sites d'accélération)

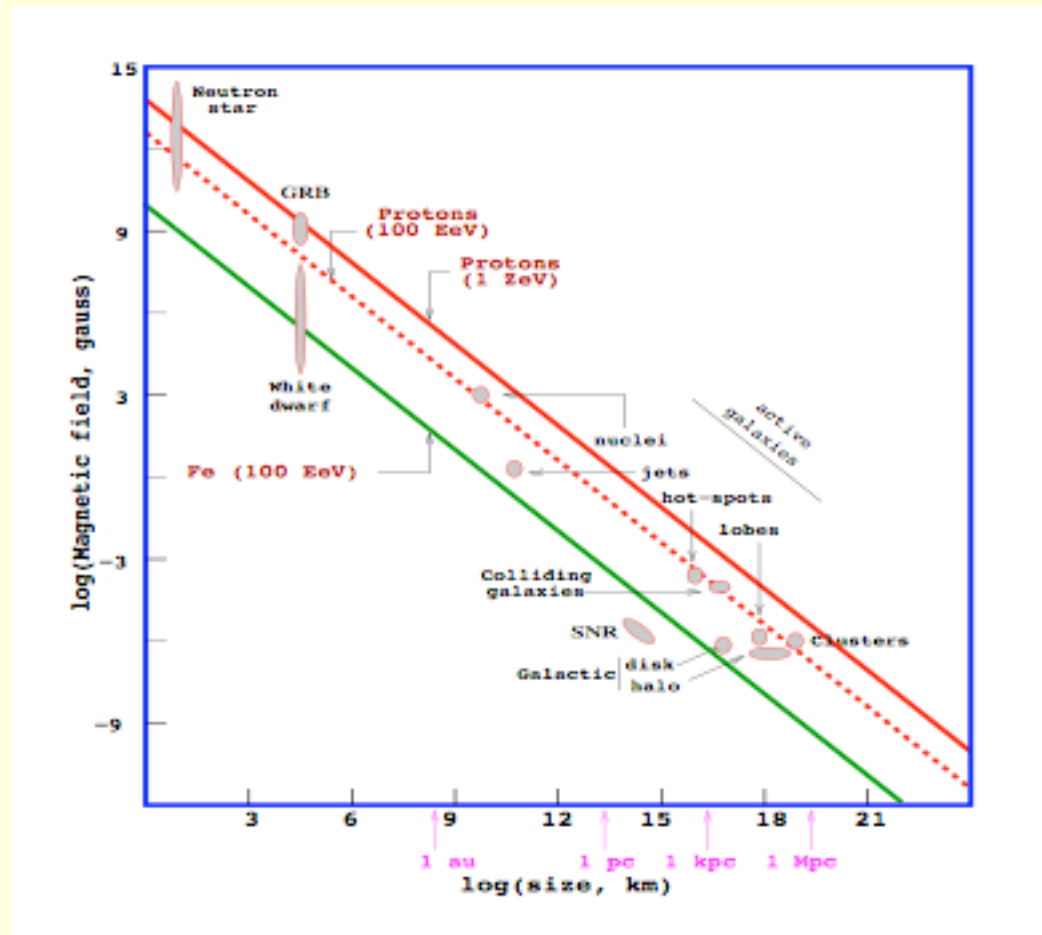


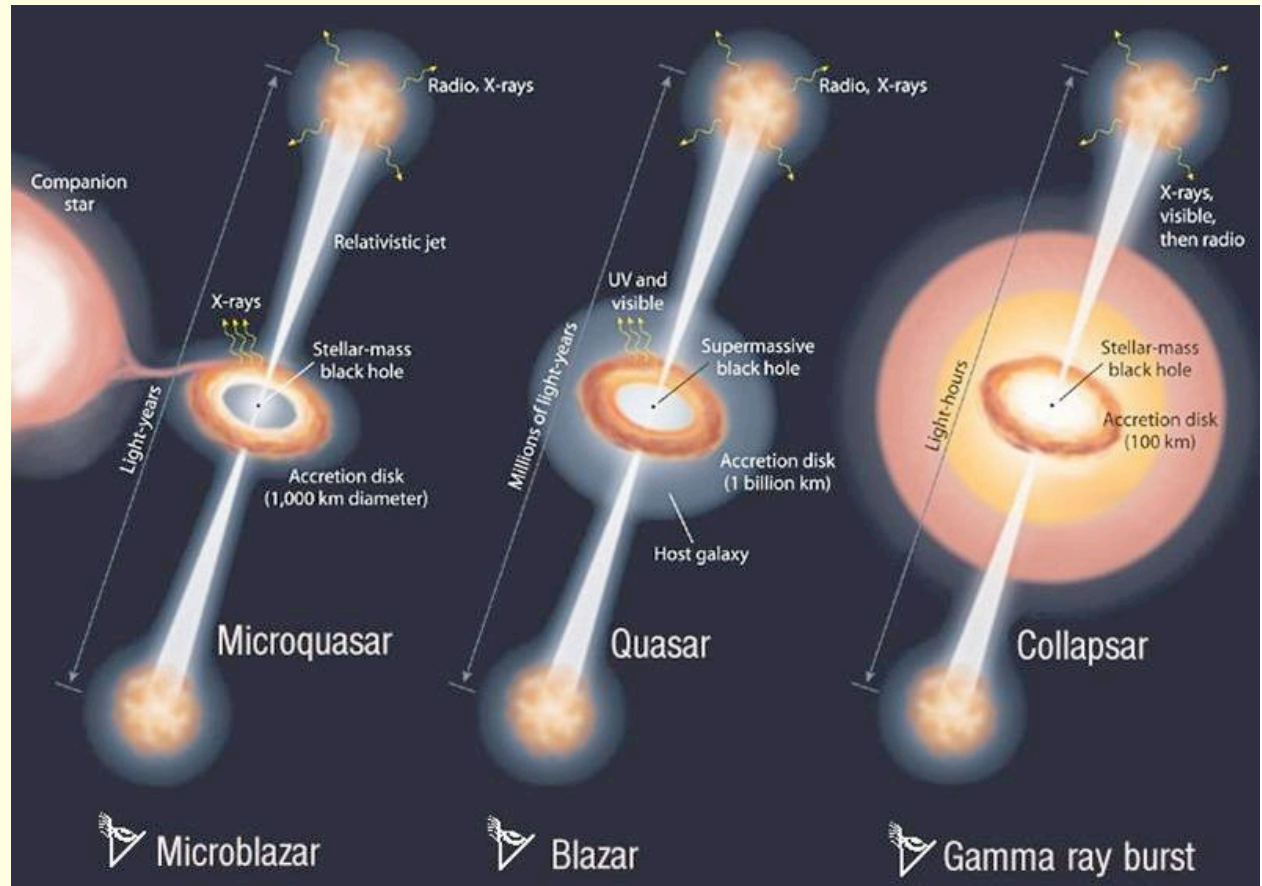
Diagramme de Hillas

Vers une approche réductionniste?

Malgré la diversité des manifestations, étonnante simplicité des briques de base :

Trous noirs

Etoiles à neutrons



Une stratégie multi-messagers

Idéalement, on voudrait étudier une même source (*) en détectant les ondes gravitationnelles, neutrinos, hadrons et photons qu'elle émet :

- les photons de haute énergie tracent les populations de particules accélérées
- les protons donnent l'information sur les accélérateurs cosmiques qui les ont produits
- les neutrinos donnent des informations sur les zones les plus profondes, opaques aux photons

Les ondes gravitationnelles complètent l'image.



Virgo

Une stratégie multi-messagers

Idéalement, on voudrait étudier une même source (*) en détectant les ondes gravitationnelles, neutrinos, hadrons et photons qu'elle émet :

- les ondes gravitationnelles fournissent des informations sur les mouvements d'ensemble de la matière dans les processus énergétiques
- les photons de haute énergie tracent les populations de particules accélérées
- les protons donnent l'information sur les accélérateurs cosmiques qui les ont produits
- les neutrinos donnent des informations sur les zones les plus profondes, opaques aux photons

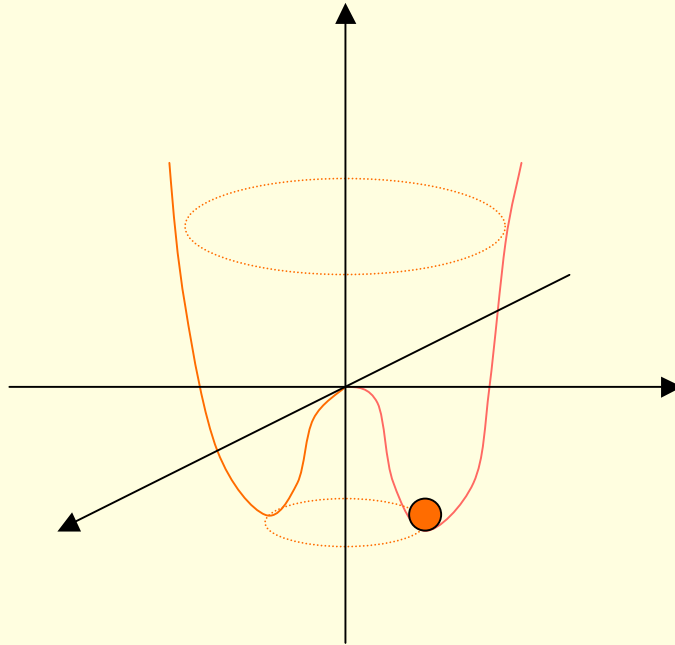
Seconde définition des astroparticules

Astroparticule: domaine à l'interface entre l'astrophysique et la physique des particules

Exemple de la cosmologie:

La physique théorique des hautes énergies y joue un rôle central

Scénario d'inflation proposé d'abord dans le contexte de la transition de phase associée à la grande unification (Guth, 81)



Fluctuations dans le CMB prédites au niveau observé par le satellite COBE :

$$V_0 = \epsilon^{1/4} 6.7 \cdot 10^{16} \text{ GeV}$$

ϵ slowroll parameter :
 $2\epsilon = (M_P V'/V)^2 \ll 1$



Exemple de la cosmologie:

La physique théorique des hautes énergies y joue un rôle central

- nucléosynthèse
- inflation
- baryogenèse
- matière noire
- ...

CMB



Succès du lancement de Planck

Le CMB est un des domaines où l'interaction entre l'astrophysique et la physique des hautes énergies est la plus féconde:

- inflation
- neutrinos
- ondes gravitationnelles primordiales
- ...

Energie noire

Si l'énergie noire est décrite par un champ scalaire, alors il est extrêmement léger (10^{-33} eV) et doit donc être extrêmement faiblement couplé à la matière.

Pas de perspective expérimentale en physique des particules

Reste le problème théorique, intimement lié au problème de l'énergie du vide.

Matière noire

Un cas d'école pour les astroparticules: recherche au LHC, détection directe, détection indirecte,...

Modèles théoriques nécessaires pour une approche cohérente

Bonne connaissance
des processus astrophysiques
absolument nécessaire!

e.g. résultats de Pamela

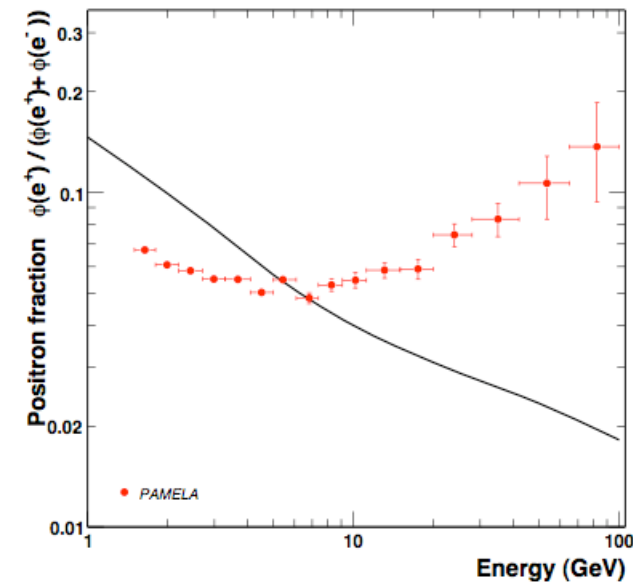


FIG. 4: PAMELA positron fraction with theoretical models. The PAMELA positron fraction compared with theoretical model. The solid line shows a calculation by Moskalenko & Strong^[39] for pure secondary production of positrons during the propagation of cosmic-rays in the galaxy. One standard deviation error bars are shown. If not visible, they lie inside the data points.

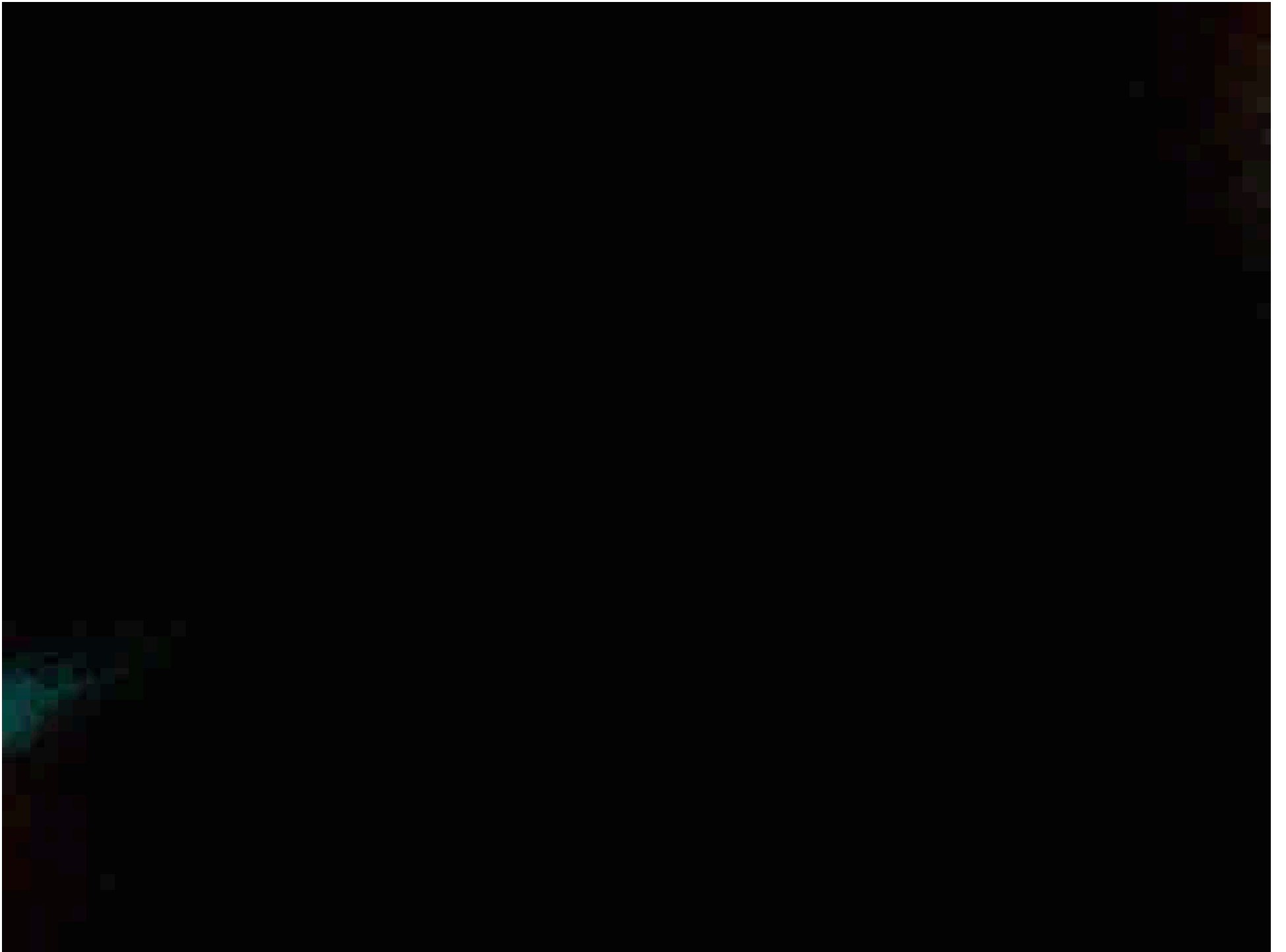
La gravitation au cœur des astroparticules
ou Le XXI^e siècle sera celui de la gravitation

Question fondamentale à résoudre: unification de la théorie quantique et de la relativité générale.

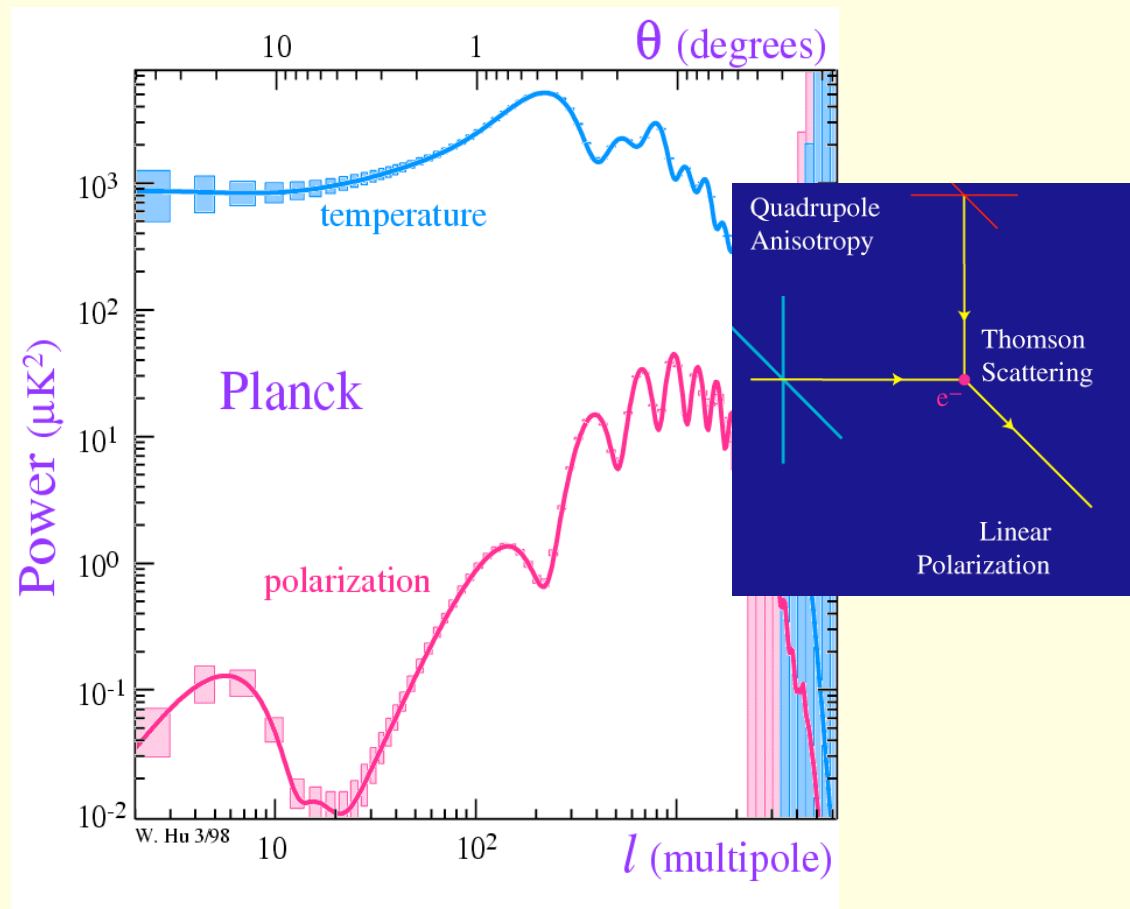
Problème associé: énergie du vide (cste cosmologique)

La découverte des ondes gravitationnelles, probablement par les interféromètres terrestres, ne sera qu'un premier pas vers une nouvelle connaissance de l'Univers.

Astrophysique des trous noirs, objets gravitationnels par excellence (VIRGO, LIGO, ... mais surtout LISA)

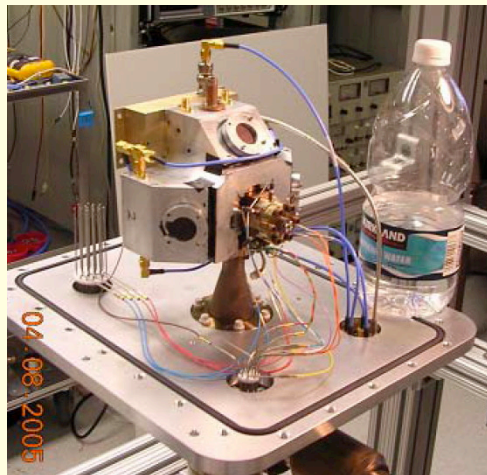


Ondes gravitationnelles primordiales (CMBPOL, successeur de LISA) nous renseignant sur les premiers instants après le big bang

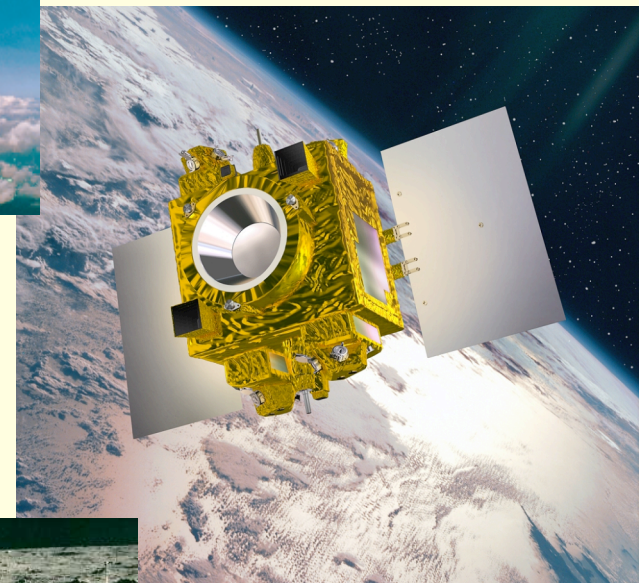


Tests des lois fondamentales (principe d'équivalence, force de gravitation à courte distance ou distance cosmologique, variation des constantes fondamentales,...)

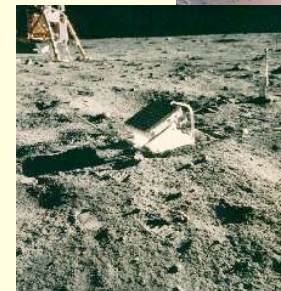
Riche programme expérimental (qui permet, lui, de tester les modèles d'énergie noire)



Horloges atomiques...



MICROSCOPE



Missions spatiales

Les questions auxquelles nous souhaitons répondre (prospective astroparticules CID47 en 2004)

Y a-t-il eu un big bang?

S'il y a bien eu inflation, quelle en est la cause dynamique?

Quelle est l'origine de l'asymétrie matière-antimatière?

Quels sont les premiers objets lumineux, et quand sont-ils apparus?

Comment détecter et identifier la matière noire? Ou la réfuter?

Quelle est la géométrie et le contenu de l'univers à grande échelle?

Comment authentifier ou réfuter l'accélération de l'expansion?

Y a-t-il une énergie noire? Pourquoi l'énergie du vide est-elle si faible?

Quelles sont les limites de validité de la relativité générale ?

Comment fonctionnent les accélérateurs cosmiques?

Que peut nous apprendre l'étude des sources énergétiques sur les lois de la physique?

Comment se forment les trous noirs?

Existe-t-il de nouveaux états de la matière aux densités et aux énergies extrêmes?

Comment explosent les Sn? Comment se forment les éléments lourds?