

introduction à l'astrophysique: aspects observationnels

- deux questions et des définitions 1.
- contexte: résumé de l'histoire de l'Univers 2.
- échelles dans l'Univers 3.
- rayonnement 4.
- 20 ans de progrès en astrophysique 5.
- les grandes questions, résumé, conclusion 6.

Hervé Dole

Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay
 Université Paris-Sud 11 et CNRS
 Institut Universitaire de France
<http://www.ias.u-psud.fr/dole/l3.php>

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique



1

1. deux questions

- 1.1 pourquoi la nuit est-elle noire ?
- 1.2 l'astrophysique est-elle une science ?

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

2

1.1 nuit noire ? paradoxe d'Olbers

- paradoxe d'Olbers
 - le ciel devrait être très brillant compte-tenu du nombre incroyablement grand d'étoiles dans l'Univers
- faisons le calcul ensemble dans le cas le plus simple
 - un Univers homogène statique
 - rempli uniquement d'étoiles
 - densité volumique n
 - identiques de luminosité L .

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

3

1.1 nuit noire ? paradoxe d'Olbers

Exercice Pourquoi la nuit est-elle noire ? Paradoxe d'Olbers simplifié.

Imaginons un espace euclidien rempli uniformément (et uniquement) d'étoiles, de densité n .

1- Expliquer pourquoi cette hypothèse n'est (vaguement) réaliste qu'à une certaine échelle spatiale. Laquelle approximativement ? Quelle est la dimension (et l'unité) de n ?

Supposons que chaque étoile est identique, de luminosité L_* , et qu'elle brille indéfiniment (ce qui est parfaitement irréaliste). La dimension de L_* est homogène à une puissance, et s'exprime par exemple en Watt.

2- Une étoile se situe à la distance r de l'observateur (situé sur Terre). Exprimer le flux F , observé de l'étoile. Quelle est la dimension de F ?

3- Soit une coquille sphérique centrée sur l'observateur terrestre, de rayon r et d'épaisseur dr . Combien d'étoiles dN se trouvent dans cette coquille ? Vérifier la dimension de dN .

4- Calculer le flux dF , reçu sur Terre par les étoiles de la coquille. Ce flux dépend-il de la distance de la coquille r ?

5- Calculer le flux F , reçu sur Terre par l'ensemble des coquilles, en intégrant dF , sur r entre $r = 0$ et $r = +\infty$. Cette intégrale converge-t-elle ? Qu'en déduisez-vous ?

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

4

pourquoi la nuit est-elle noire ?

- Digges (16è), Chéseaux (17è), Halley (18è), Olbers (19è)
 - Herschel, Kant, Proctor, Fournier d'Albe, Charlier
 - Poe (19è), Kelvin (19è)
 - Wesson (1987, 1991)
 - finitude vitesse lumière c
 - âge fini des objets
 - expansion Univers
- horizon cosmologique → oui
- existence d'émissions reliques
 - recombinaison: fond cosmologique
 - formation et évolution des galaxies: fond extragalactique
 - expansion, et prise en compte de tout le spectre e. m.
- bof

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

5

1.2 science ?

- l'astrophysique est-elle une science ?
 - la méthode expérimentale exige reproductibilité des expériences. Or nous n'avons qu'un seul univers...
 - l'astrophysique est une science d'observation, comme une science naturelle.
 - L'astrophysique est aussi une science abstraite: basée sur des principes physiques fondamentaux, elle essaie de reconstituer l'histoire de l'univers.
- fondée sur des principes et confrontée aux observations, l'astrophysique est bien une science.

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

6

1.3 astrophysique

une définition de l'astrophysique

- étude physique des objets célestes, de leurs propriétés, structure et évolution
- science pluridisciplinaire
- objets célestes incluent par exemple:
 - l'Univers dans son ensemble -> cosmologie
 - les types de galaxies -> extragalactique
 - les (exo-)planètes -> sciences planétaires
 - la chimie du milieu interstellaire -> astrochimie
 - les processus chimiques prébiotiques -> astrochimie

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

7

1.3 astrophysique: postulats

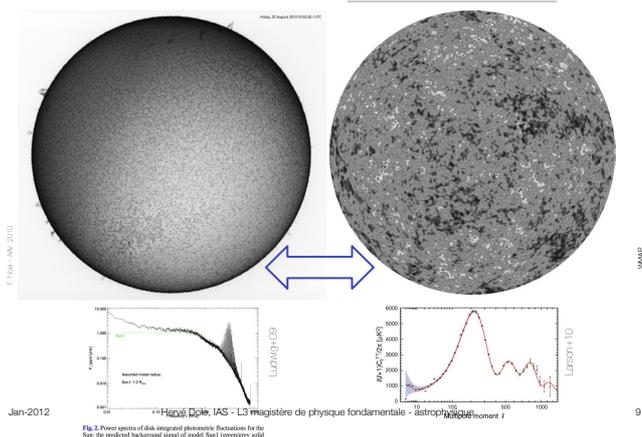
- l'Univers est intelligible
 - malgré le fait qu'il soit constitué de la somme de ses constituants, peu ou pas compris individuellement
- les lois de la physique
 - sont valables partout et tout le temps
- Principe cosmologique
 - l'univers est homogène+isotrope a une certaine échelle (grande)
 - aucun lieu n'est privilégié dans le cosmos

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

8

physique universelle: exemple



Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

9

1.3 astrophysique

- méthodologies
 - observation
 - et interprétation à l'aide de modèles
 - aspects technologiques et techniques, e.g. instruments dans l'espace
 - théorie
 - simulation

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

10

Ordres de Grandeurs à Savoir

- Temps
 - 1 an $\sim 3 \times 10^7$ s
 - "âge" de l'Univers ~ 13.7 Gans
 - âge du système Solaire ~ 4.5 Gans
- Distances
 - Unités: a-l, et surtout parsec (pc, kpc, Mpc)
 - 1 a-l $\sim 10^{16}$ m
 - 1 pc = 3,26 a-l
 - 1 Mpc $\sim 3 \times 10^{22}$ m
 - Taille d'une galaxie ~ 30 à 100 kpc
 - Taille d'un amas de galaxies ~ 1 à 3 Mpc
- Masse
 - Soleil: 10^{30} kg
- Energie
 - 1eV ~ 10000 K
- Densité de matière baryonique dans l'univers
 - ~ 0.25 proton (ou atome d'Hydrogène) par m^3 (densité critique $\sim 5 m^{-3}$)

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

11

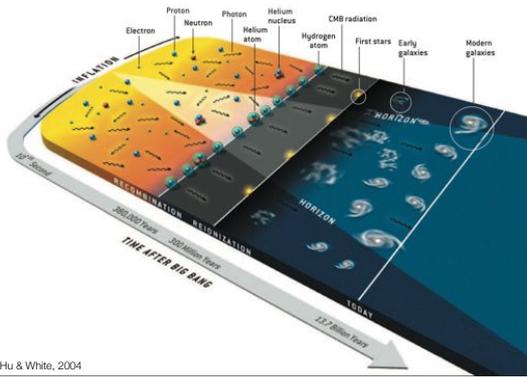
2. contexte: résumé de l'histoire

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

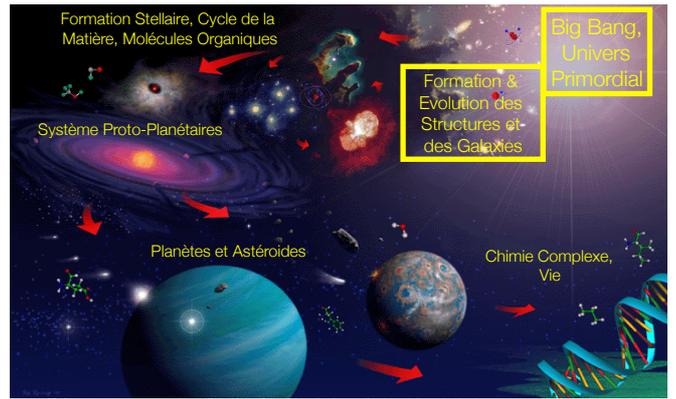
12

history of the universe



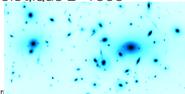
Hu & White, 2004

une évolution de l'Univers



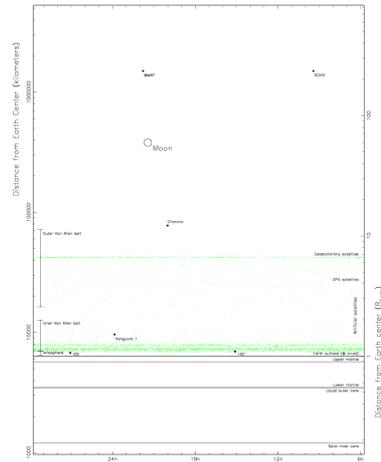
3. Les Echelles dans l'Univers

- **Système Solaire**
 - 80 au
 - qqes heures lumière
- **Groupe Local**
 - diamètre Galaxie: 100 000 a-l
 - Andromède: 2 millions a-l
- **Notre Galaxie**
 - Prox Cen: 4.6 a-l
 - Centre de la Galaxie: 30 000 a-l
- **Grandes Structures**
 - Virgo: 17 Mpc Coma: 110 Mpc, z=0.05
 - Amas z ~ 1
 - Galaxies, quasars: z ~ 6
 - Fond diffus cosmologique z ~ 1000



1/6

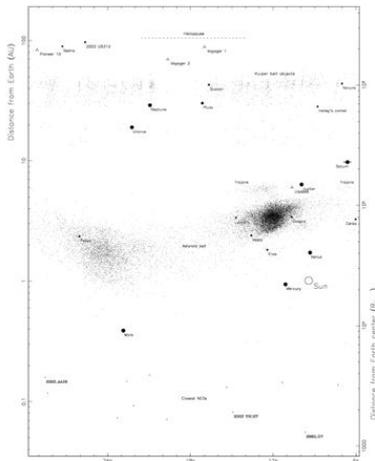
Voisinage terrestre



Gott et al, 2005, ApJ, a-ph/0310571

2/6

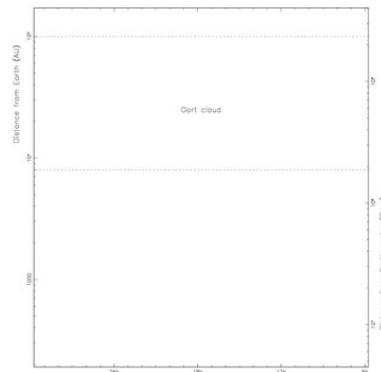
Système Solaire



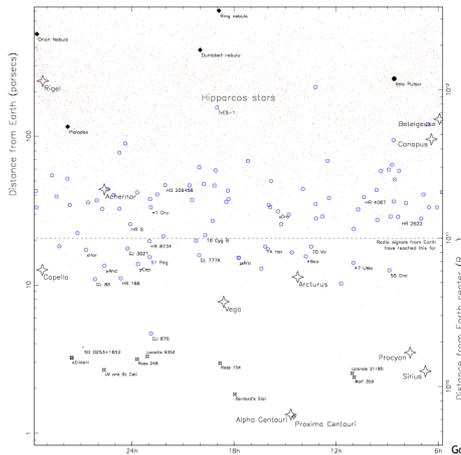
Gott et al, 2005, ApJ, a-ph/0310571

3/6

Au delà du Système Solaire



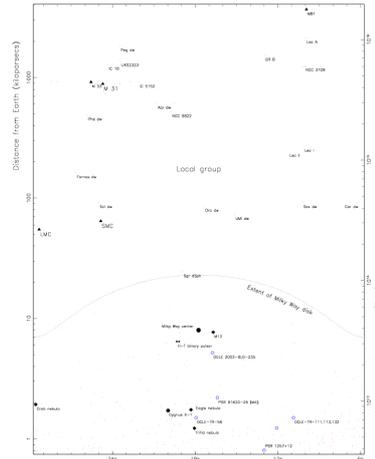
Gott et al, 2005, ApJ, a-ph/0310571



4/6

Notre Galaxie

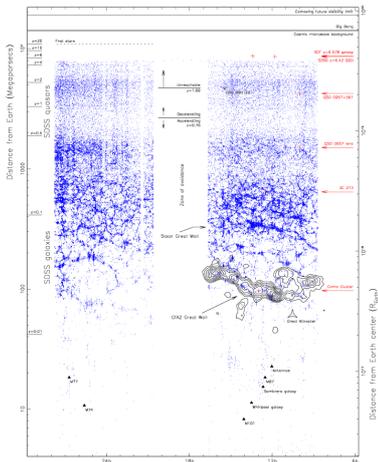
Gott et al, 2005, ApJ, a-ph/0310571 19



5/6

Groupe Local

Gott et al, 2005, ApJ, a-ph/0310571 20

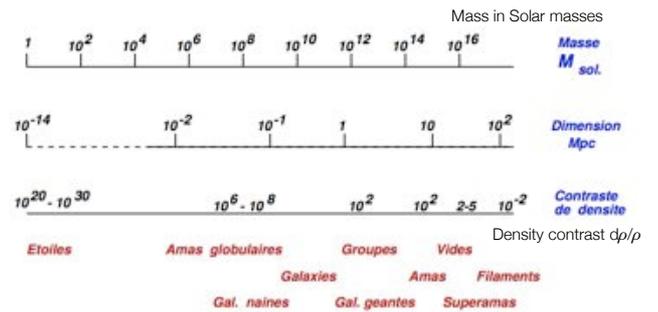


6/6

Grandes échelles

Gott et al, 2005, ApJ, a-ph/0310571 21

échelles: masse, dimension, contraste d



Yannick Mellier, IAP, 2002

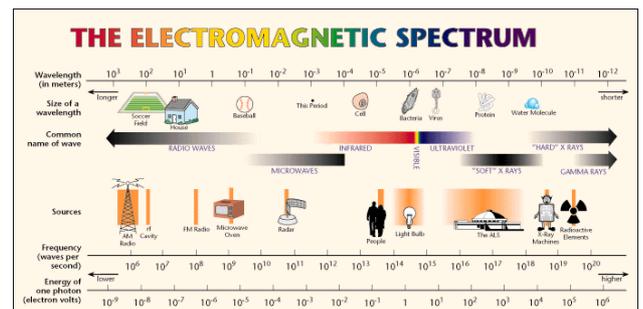
Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

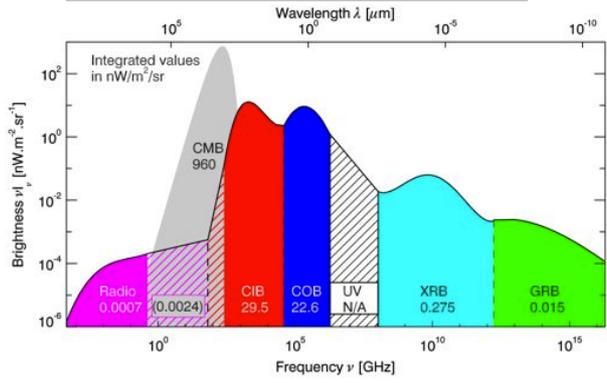
22

4. rayonnements

longueurs d'onde & fréquences



rayonnements de l'univers



Jan-2012

Dole et al., 2006 ; Dole 2010 HDR
Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique Dole & Béthermin in prep 25

longueurs d'onde

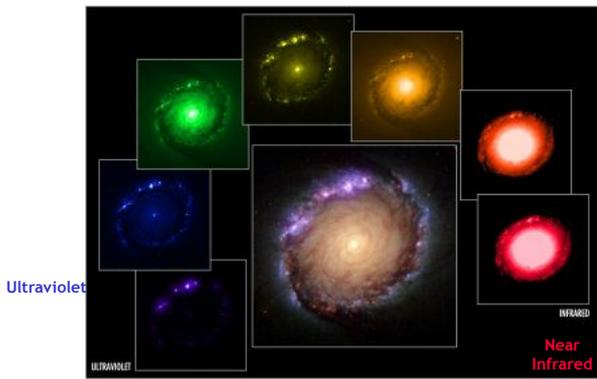


Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

H Dole 26

NGC 1512 à plusieurs Longueurs d'onde

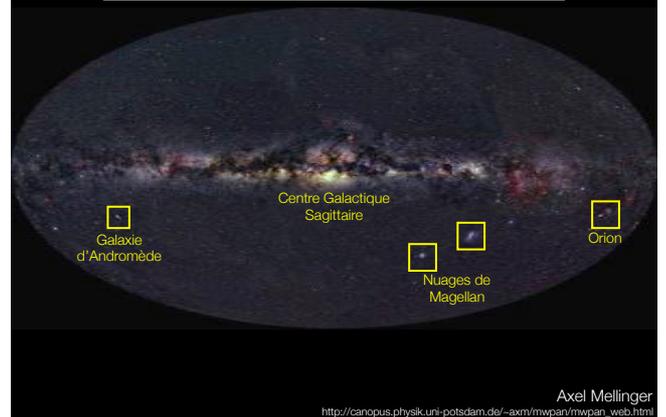


Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

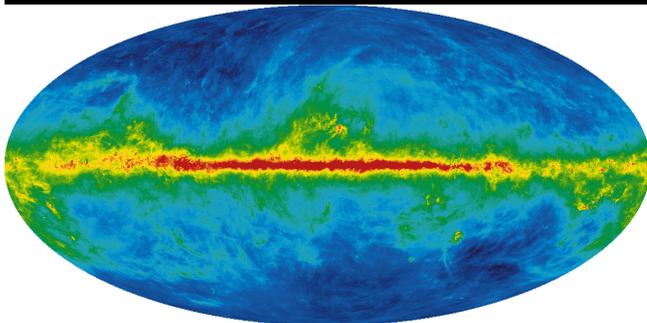
27

le ciel dans le visible



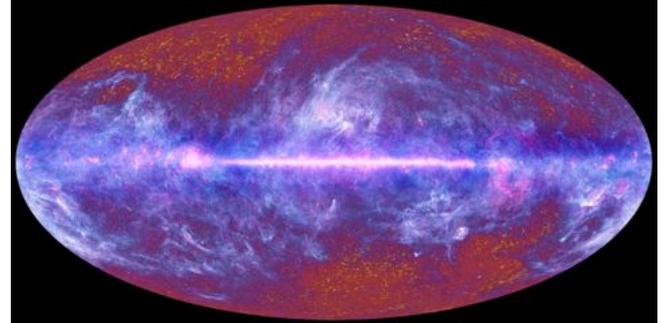
http://canopus.physik.uni-potsdam.de/~axm/mwpan/mwpan_web.html

le ciel en infrarouge



IRAS 100μm IRIS

le ciel en micro-ondes [mm]

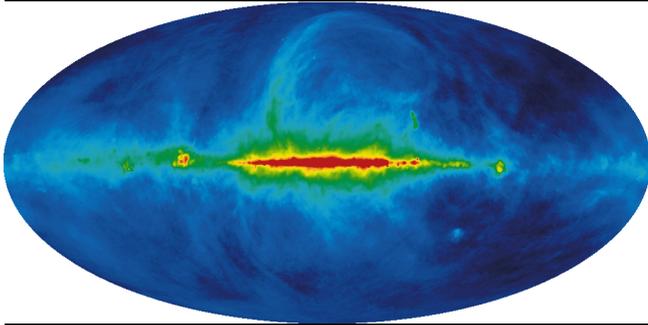


The PLANCK one-year all-sky survey



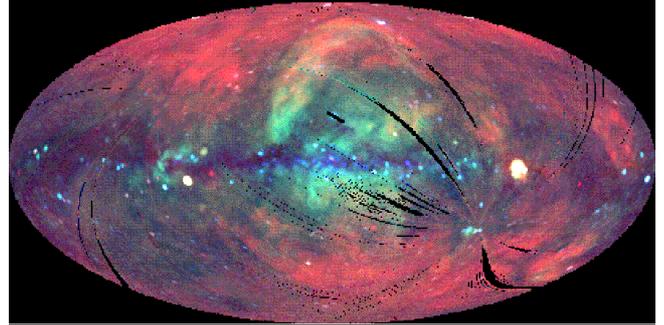
(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

le ciel en ondes radio



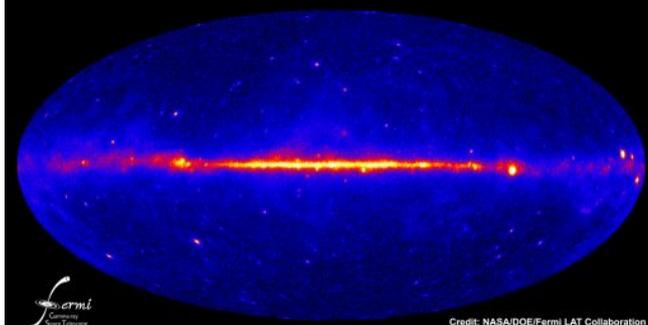
21 cm Leiden/Parkes

le ciel en rayons X



ROSAT

le ciel en rayons gamma



Credit: NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration

FERMI LAT



Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique M81 NOAO

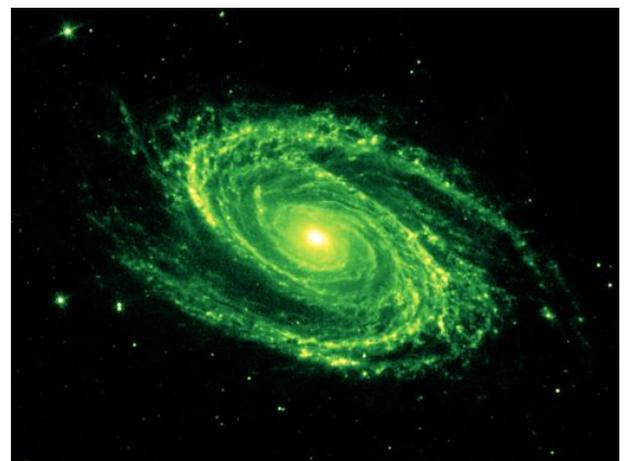
34



Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique M81 IRAC 3.6

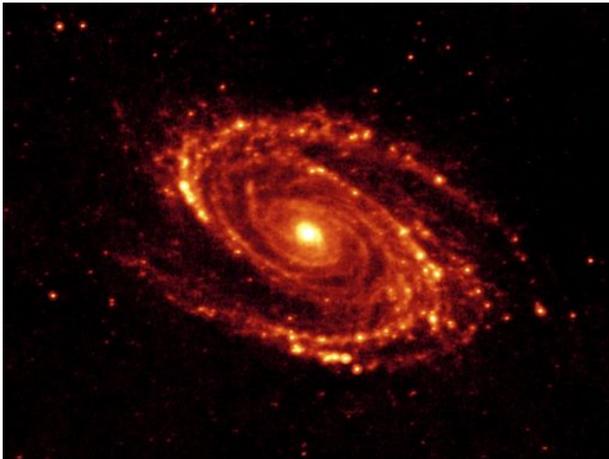
35



Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique M81 IRAC 8.0

36



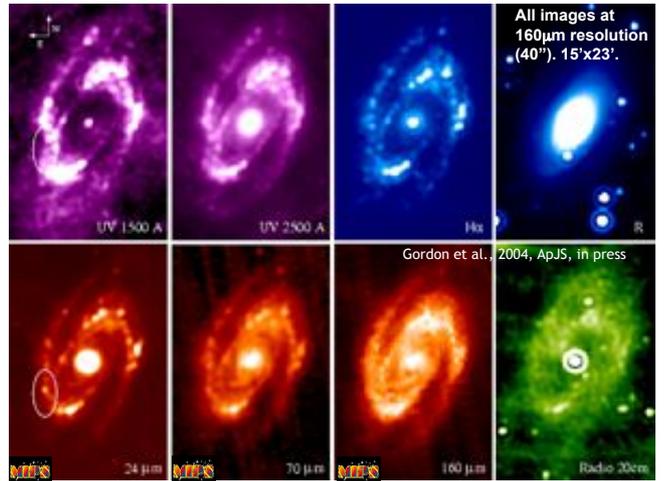
Jan-2012 Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique **M81 MIPS 24** 37



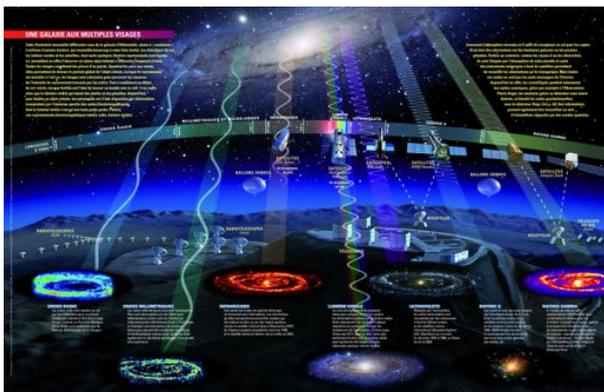
Jan-2012 **Spitzer Space Telescope** - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique **M81 IRAC 3.6 IRAC 4.5 IRAC 5.8 IRAC 8.0 MIPS 24** 38



Jan-2012 Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique **M81 NOAO** 39



la lumière



Jan-2012 Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique Journal du CNRS 41

longueurs d'onde

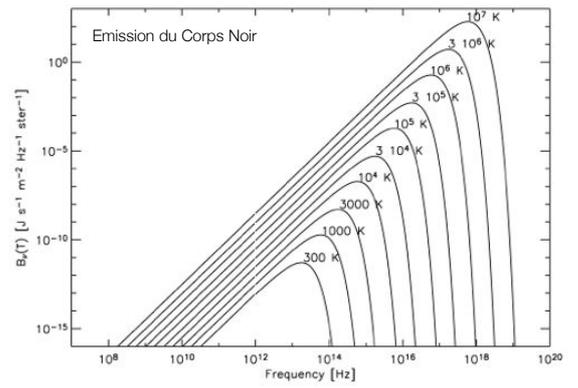
- Spectre électromagnétique
 - Classé par énergie décroissante = longueur d'onde croissante:
 - Rayons gammas, X
 - Ultraviolet [0.01-0.4 μm]
 - Visible [0.4-0.8 μm]
 - Infrarouge
 - proche [0.8-5 μm], moyen,[5-30 μm], lointain [30-200 μm]
 - Radio
 - Submillimétrique [0.2mm-1mm]
 - Millimétrique [1-10mm]
 - Centimétrique [1-10cm]
 - Etc..

Jan-2012 Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique 42

longueurs d'onde

- Information
 - Les photons émis tracent les conditions physiques du milieu qui leur a donné naissance
- Exemples
 - Milieu très chaud: beaucoup d'énergie: photons énergétiques
 - Milieu froid: peu d'énergie: photons à grande longueur d'onde
- Intérêt
 - Il faut observer à plusieurs longueurs d'ondes !
 - Les photons permettent donc de sonder la nature du milieu physique
 - Par exemple, détermination de la température

Emission vs Temperature



Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

43

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

44



Hervé Dole



Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

Montage: CMB, LSS, galaxies: SPAD6

45

la lumière



visible

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

(c) Martin Pugh - APOD 2010 Jan 9

46

la lumière



ultraviolet

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

GALEX / NASA

47

la lumière



infrarouge

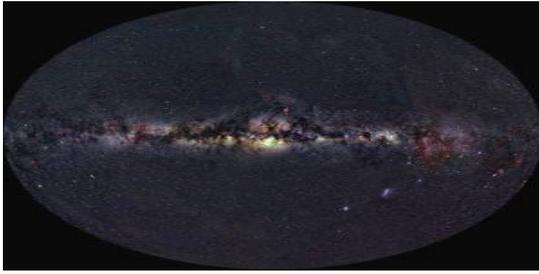
Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

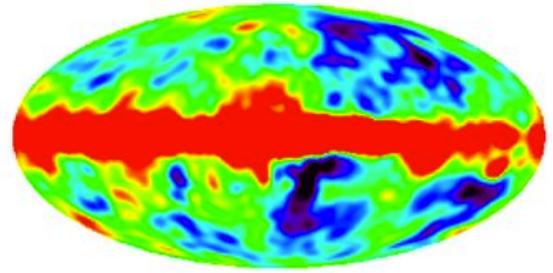
WISE / NASA

48

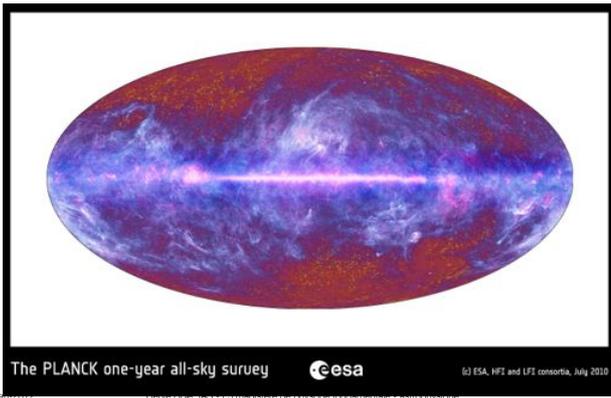
illustration des progrès: 2 exemples



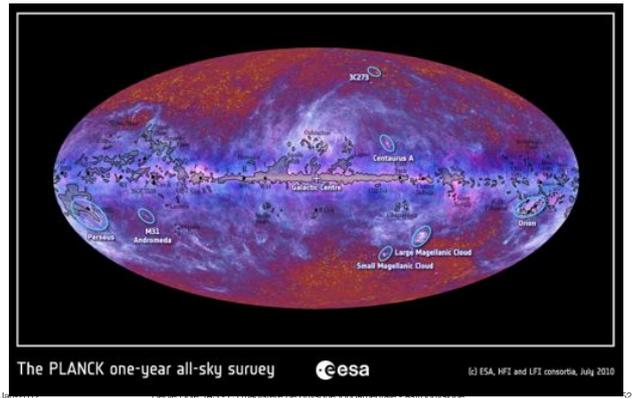
1. le ciel radio en 1992 ...



... et en 2010

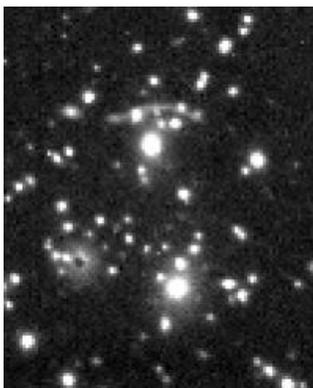


... et en 2010



2. amas de galaxies en 1985...

en 1985
téléscope
CFHT
Hawaïi



amas de galaxies en 1990...

en 1990
téléscope
CFHT
Hawaïi



... amas de galaxies en 2009



en 2009

télescope
Hubble

Jan-2012

pourquoi ces progrès ?

Nécessité **scientifique** d'observer des astres

- à toutes les fréquences de la lumière
- peu lumineux
- lointains
- « petits » en taille angulaire

Ces observations sont confrontées aux **théories physiques**, modèles et simulations numériques pour permettre de **comprendre la formation et l'évolution** de notre Univers et de ses constituants.

Observation et **théorie** sont nécessaires.

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

56

pourquoi ces progrès ?

- cette nécessité **scientifique** est le **moteur de l'évolution technologique** en astrophysique
- demande **sociétale** et/ou politique, économique ou **géostratégique** de poursuivre des développements technologiques, dont l'astrophysique est le moteur ou le bénéficiaire

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

57

pourquoi ces progrès ?

- cette nécessité **scientifique** est le **moteur de l'évolution technologique** en astrophysique
- demande **sociétale** et/ou politique, économique ou **géostratégique** de poursuivre des développements technologiques, dont l'astrophysique est le moteur ou le bénéficiaire

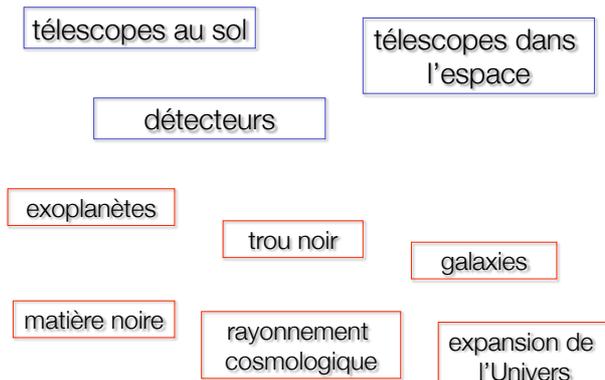
satellite Planck ESA ~15 ans ~1 milliard d'Euro dont 600 ME pour la France	satellite Spitzer NASA ~20 ans ~1.3 milliards \$	4+2 télescopes VLT ESO ~10 ans ~500 millions d'Euro
comparaisons perfides: - coût baisse TVA restauration: 2.5 milliards en 1 an - coût bouclier fiscal 2008+2009: 1.2 milliards en 2 ans - coût d'un rafale: 140 millions (Planck=1/2 rafale/an)		
Ballon Archeops CNES ~5 ans ~5 millions d'Euro		

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

58

au menu



Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

59

télescopes au sol

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

60

« petits » télescopes: <4m



NTT, ESO, Chili, 3.60m

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique



CFHT, Hawai'i 3.60m

61

« grands » télescopes: >8m



Keck: 10m

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique



VLT: 8m

62

avènement des grands
télescopes dans les années 1990

les plus grands télescopes



GBT: 100m

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique



Nobeyama: 45m

63

les réseaux de télescopes



Plateau de Bure, France - IRAM



Very Large Array, NM - NRAO



Australia Telescope Compact Array, NSW – ATNF CSIRO

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

64

Années 1980
et **ALMA qui arrive**

grands télescopes optiques



Very Large Telescope, Chili – ESO
la clef: télescope géant + instrumentation performante
(caméra ou spectrographe multi-objets)

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

ESO

65

télescopes dans l'espace

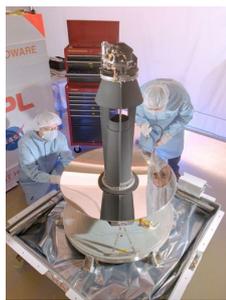


Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

66

télescopes dans l'espace: petits !



Spitzer: 85 cm lancé en 2003



ISO: 60 cm lancé en 1995



Planck: 1.80m – Herschel: 3.5m lancés en 2009

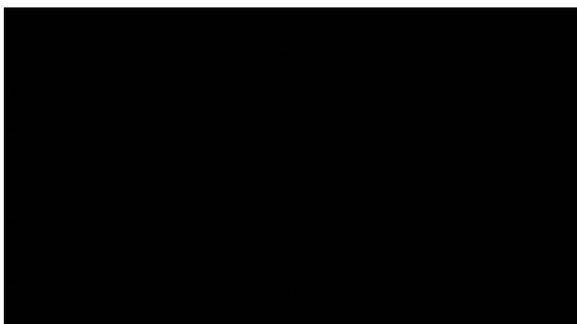
télescopes dans l'espace: petits !



Hubble: 2.40m lancé en 1990

bientôt: JWST avec 6.5m

15 à 20 ans de projet...

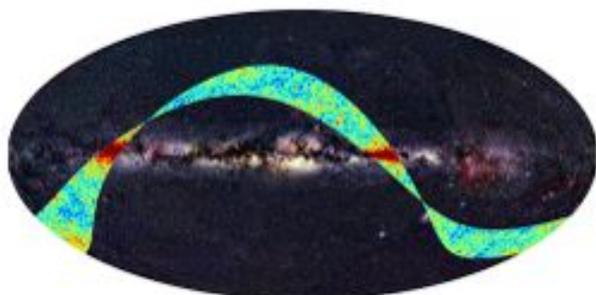


opérations quotidiennes Planck à Orsay



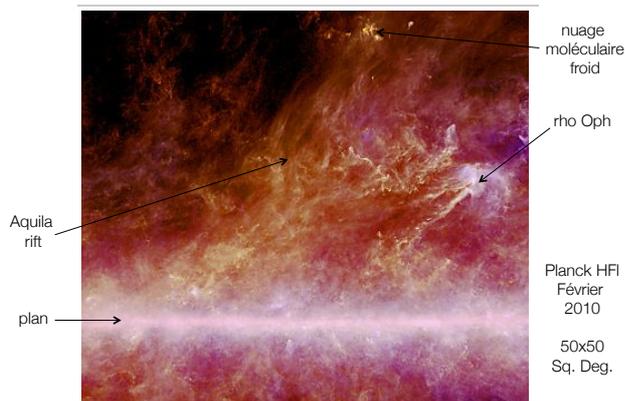
Planck HFI – Instrument Operation Room – Institut d'Astrophysique Spatiale

premières images publiques de Planck



Planck First Light Survey – Septembre 2009

premières images publiques de Planck



Planck HFI
Février
2010
50x50
Sq. Deg.

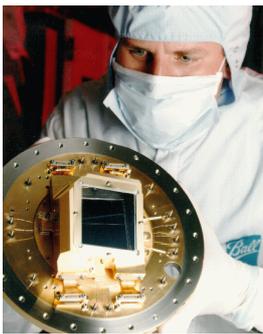
premières images publiques de Planck

Planck HFI - Mars 2010 - Orion

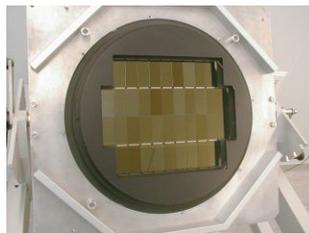


détecteurs

taille des détecteurs

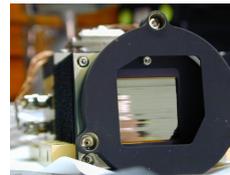


ACS - Ball - NASA

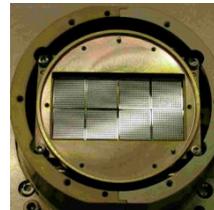


MegaCam
340 millions pixels
CEA

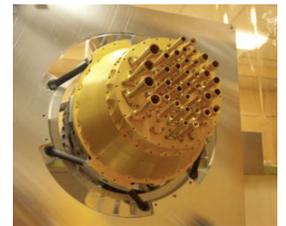
types de détecteurs



MIPS 70um
Spitzer
1000 pixels
NASA
(H. Dole)

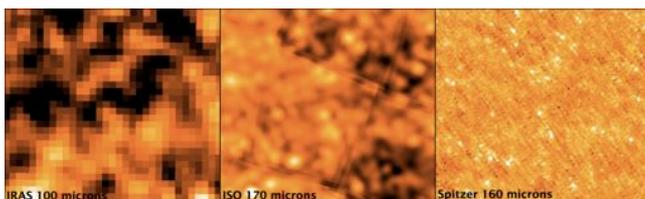


PACS
Herschel
CEA



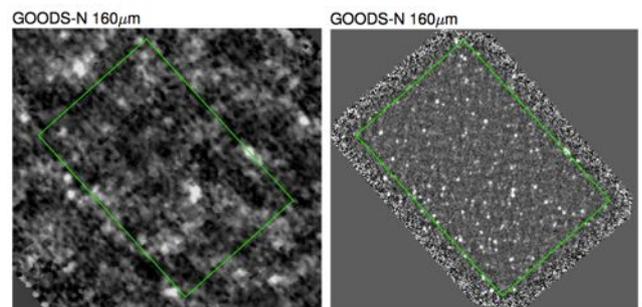
planck HFI
refroidi à 0.1 K
IAS, CNES, et HFI consortium

gain en résolution angulaire



même région du ciel observée par 3 télescopes de génération différente
- IRAS en 1984
- ISO en 1997
- Spitzer en 2004

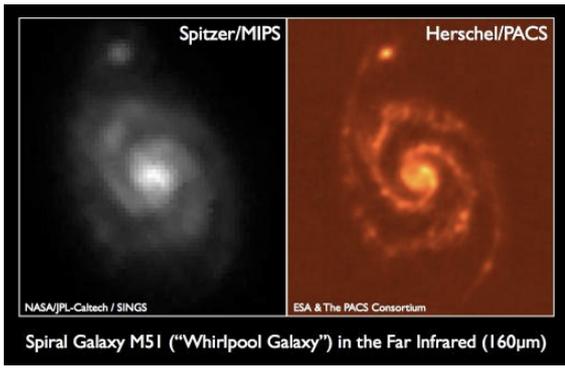
résolution du fond infrarouge en galaxies



Spitzer MIPS 160um
FIDEL
2005

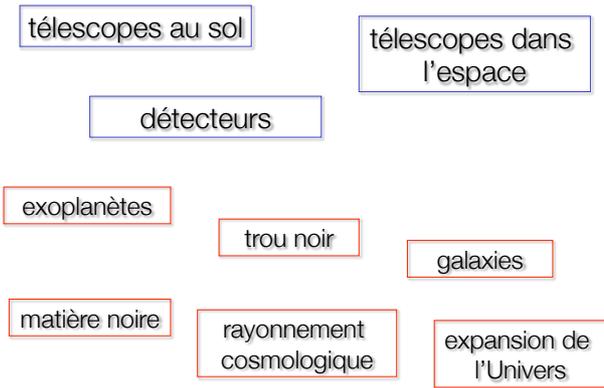
Herschel PACS 160um
PEP
2010

gain en résolution: détecteurs + télescope



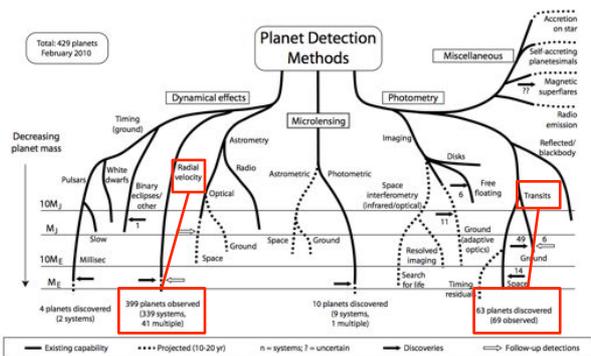
résultats scientifiques

au menu



exoplanètes

473 exoplanètes depuis 1995



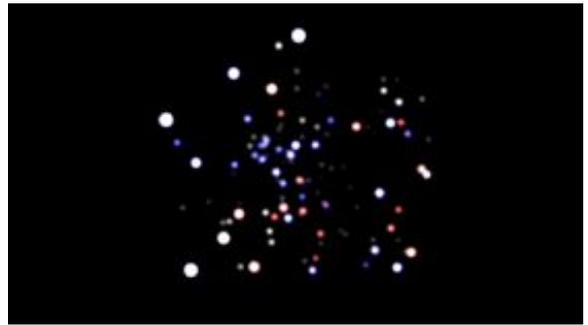
473 exoplanètes depuis 1995



- du Jupiter chaud
- au petit Saturne
- à la super Terre

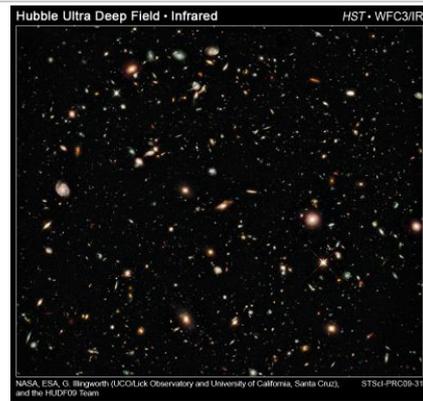
trou noir

trou noir au centre de notre Galaxie



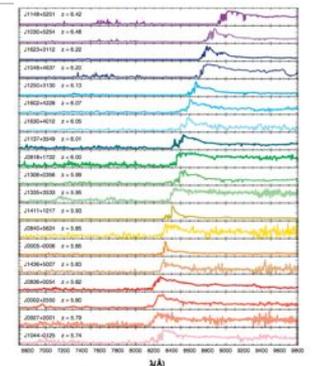
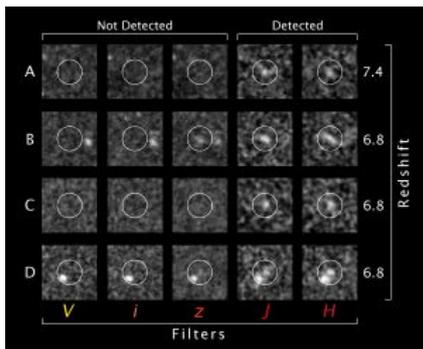
galaxies

voir loin c'est voir il y a longtemps



quelques galaxies lointaines

la lumière se décale vers le rouge

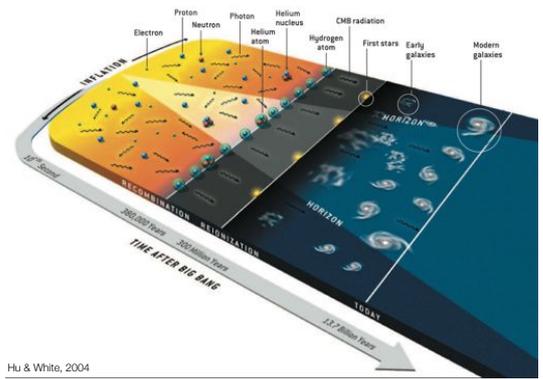


Fan, 2006, ARAA

Figure 1
Multiple resolution spectra of numerous SDSS galaxies at $z = 0.42$. Adapted from Fan et al. (2006).

rayonnement cosmologique

petite histoire de l'Univers

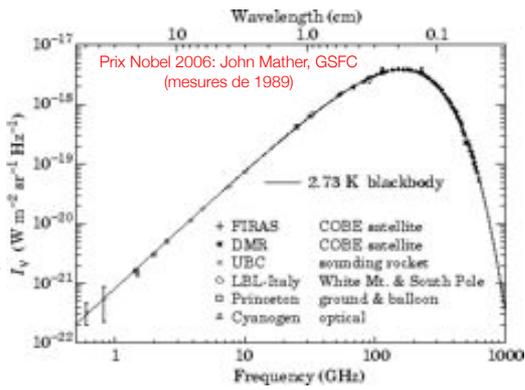


Hu & White, 2004

le rayonnement de corps noir

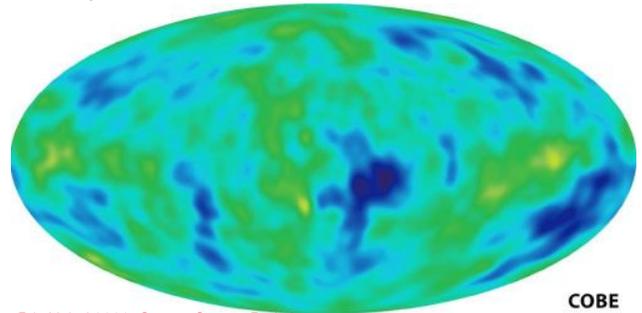
corps noir
T=2.725 K

L'Univers est rempli de rayonnement: la nuit n'est pas noire, mais brillante en radio.



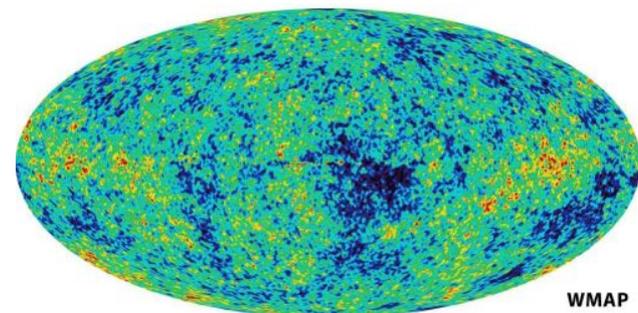
fluctuations de température

l'amplitude des fluctuations est de l'ordre de la dizaine de microKelvin !

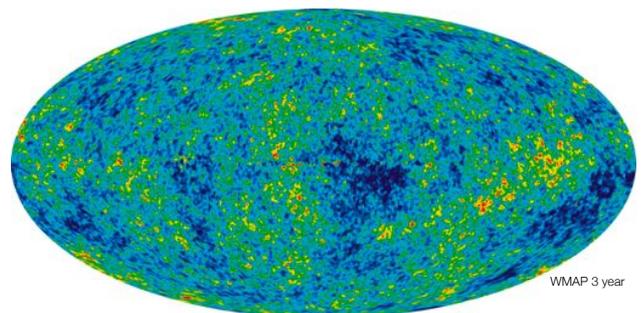


Prix Nobel 2006: George Smoot, Berkeley (mesures de 1992)

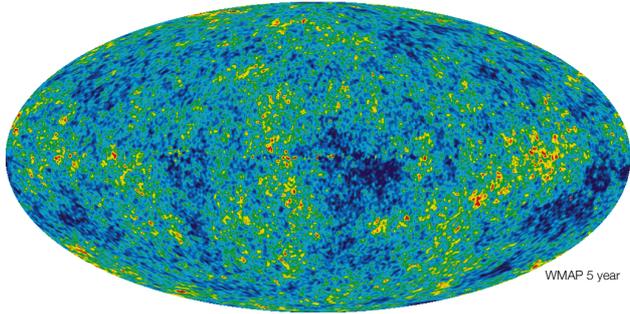
fluctuations de température



fluctuations de température



fluctuations de température

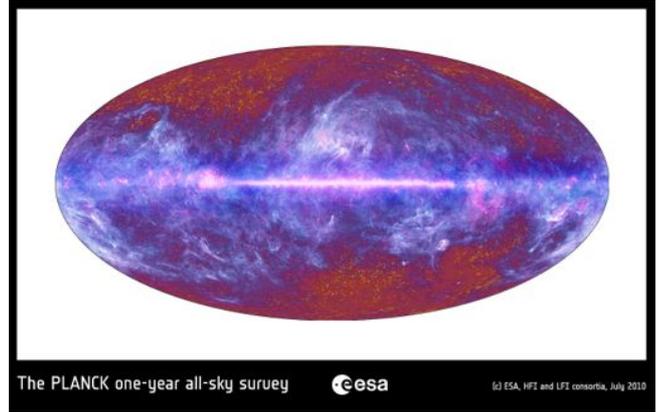


Jan-2012

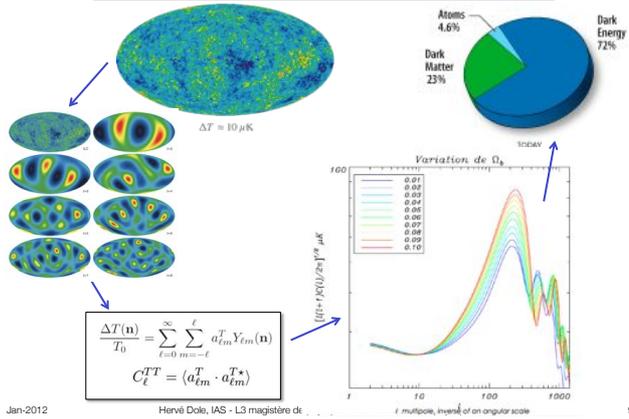
Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

97

fluctuations de température



statistics of anisotropies

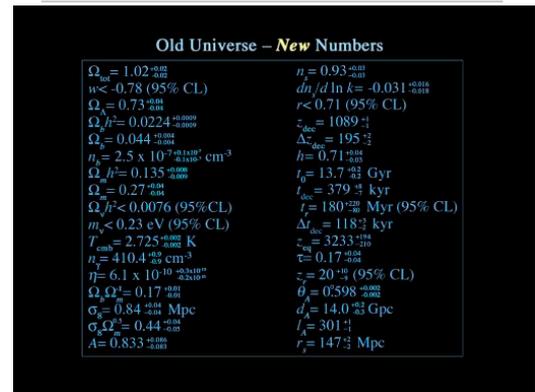


Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de

99

l'Univers en chiffres – précis !

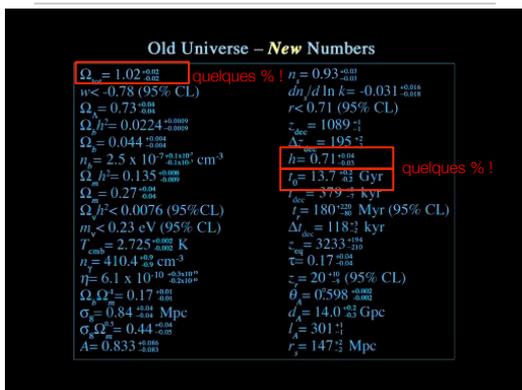


Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

WMAP Web Site 100

l'Univers en chiffres – précis !



Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

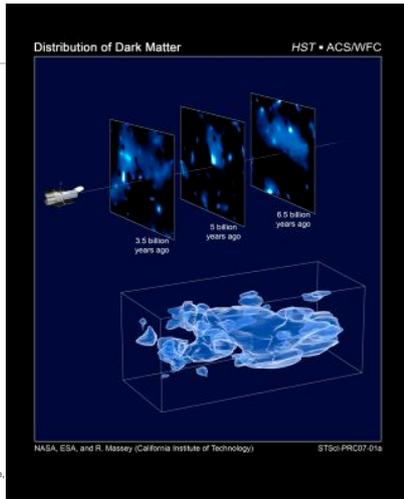
WMAP Web Site 101

matière noire

Jan-2012

Hervé Dole, IAS - L3 magistère de physique fondamentale - astrophysique

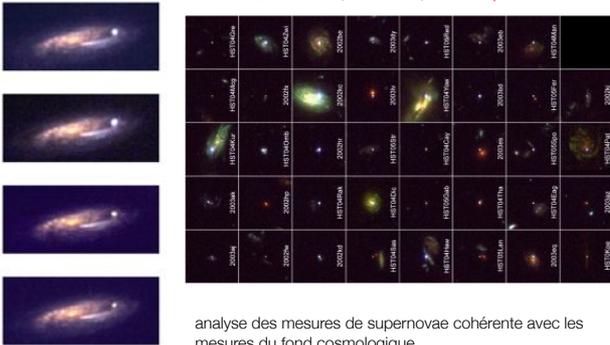
102



expansion accélérée de l'Univers

mesures de supernovae lointaines

Prix Nobel 2011: Riess, Perlmutter, Schmidt (mesures de 1998)



Riess et al., HST NASA

résumé (1)

- l'astrophysique
 - est une science
 - aspects observationnels et théoriques; confrontation des deux.
 - a des postulats:
 - Univers intelligible ; Lois de la physique valables partout ;
 - a pour objet l'étude physique des propriétés, de la structure et de l'évolution des objet célestes
- distances dans l'univers
 - Techniques, difficultés
 - connaître les ordres de grandeur (distances, âge, Mpc, ..)

résumé (2)

- Pourquoi la nuit est-elle noire ?
 - 1. Finitude de $c +$ univers a un âge fini (expansion): existence d'un horizon. En fait explication insuffisante.
 - 2. Parce que l'univers est en expansion: décalage vers le rouge. La nuit n'est en fait pas noire: rayonnement diffus cosmologique à 2.75K.

résumé (3)

- longueurs d'ondes du rayonnement
 - rayons gamma, X, UV, visible, IR, submm, radio
 - chaque photon émis trace le milieu physique qui lui a donné naissance (en particulier, la température)
 - loi du corps noir importante
 - loi du déplacement de Wien
 - intérêt d'observer à plusieurs longueurs d'ondes

résumé (4)

- 20 ans de progrès
 - proviennent du développement des **télescopes** au **sol** et dans l'**espace**
 - mais aussi des avancées technologiques des **détecteurs** et de la **puissance de calcul** pour le traitement/archivage/diffusion des données et les simulations
 - l'astrophysique est tantôt moteur, tantôt bénéficiaire
 - ces progrès continuent !

Résultats marquants:

- découverte des **exoplanètes** et caractérisation (plus de 400)
- mesure fine du **rayonnement cosmologique**
- découverte de l'**expansion accélérée** de l'Univers

résumé des connaissances actuelles

scénario du Big Bang

- Univers primordial: dense et chaud
- Univers en expansion
 - Avec épisode d'inflation au début
 - Expansion accélérée aujourd'hui
- Présence d'un rayonnement isotrope de corps noir
- Abondance des éléments légers

le fond cosmologique

- Rayonnement isotrope
- Corps noir $T=2.725K$
- Dernière surface de diffusion, $z=1100$, quand $T\sim 3000K$
- Infimes fluctuations (10^{-5}): graines des grandes structures d'aujourd'hui (amas de galaxies)
- **histoire de l'Univers jeune**

(parmi) les grandes questions

évolution de notre Univers

- Comment s'est déroulée l'inflation ?
- Qu'est-ce que l'énergie noire ?
- Comment évolue-t-elle avec le temps ?
- Qu'est-ce que la matière noire ?

évolution des structures

- Comment se forment les premières galaxies ?
- Comment a eu lieu la réionisation ?
- Comment s'agrègent les amas de galaxies ?
- Comment les galaxies se forment-elles dans les halos de matière noire ?

Conclusions

- astrophysique
 - science complexe
 - toute la physique et les mathématiques
 - physique des particules
 - mécanique (relativité r & g), e-m, méca quantique, phy stat, thermo, ...
 - observations difficiles
 - utilisation de tout le spectre e-m
 - utilisation de toutes les particules possibles
 - nécessité d'utiliser des technologies de pointe
 - on se propose cette année de donner un avant-goût
 - thèmes: rayonnement, instabilités, statistique, etc.
 - approche plus complète et poussée en M1