

*Scienza e metodo – Un confronto con scienziati e filosofi sui metodi della scienza
Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 10-11 Ottobre 2013*

Come indagare il cosmo: Vedere l'invisibile



Planck Collaboration, 2013

van Gogh - Starry night (Aries, 1889)

Marco Bersanelli

Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Milano

Indagare il cosmo

Peculiarità dell'oggetto → Conseguenze nel metodo

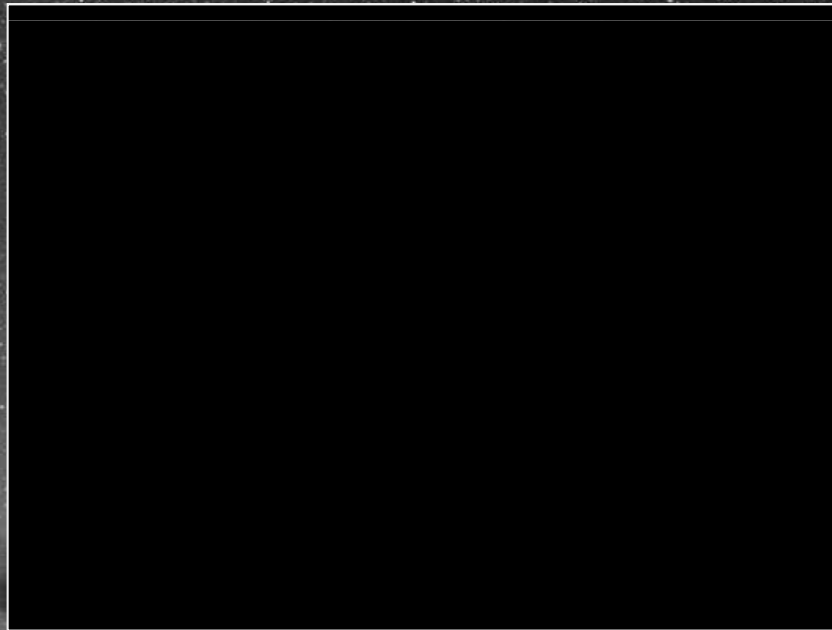
- L'oggetto dell'indagine è inaccessibile, non manipolabile
Non possiamo far altro che raccogliere ("vedere")
quello che ci arriva dal cielo
- Cosmologia: unico oggetto indagabile (universo)
- Grandi distanze: vediamo indietro nel tempo

Che cosa significa che noi "vediamo" qualcosa?

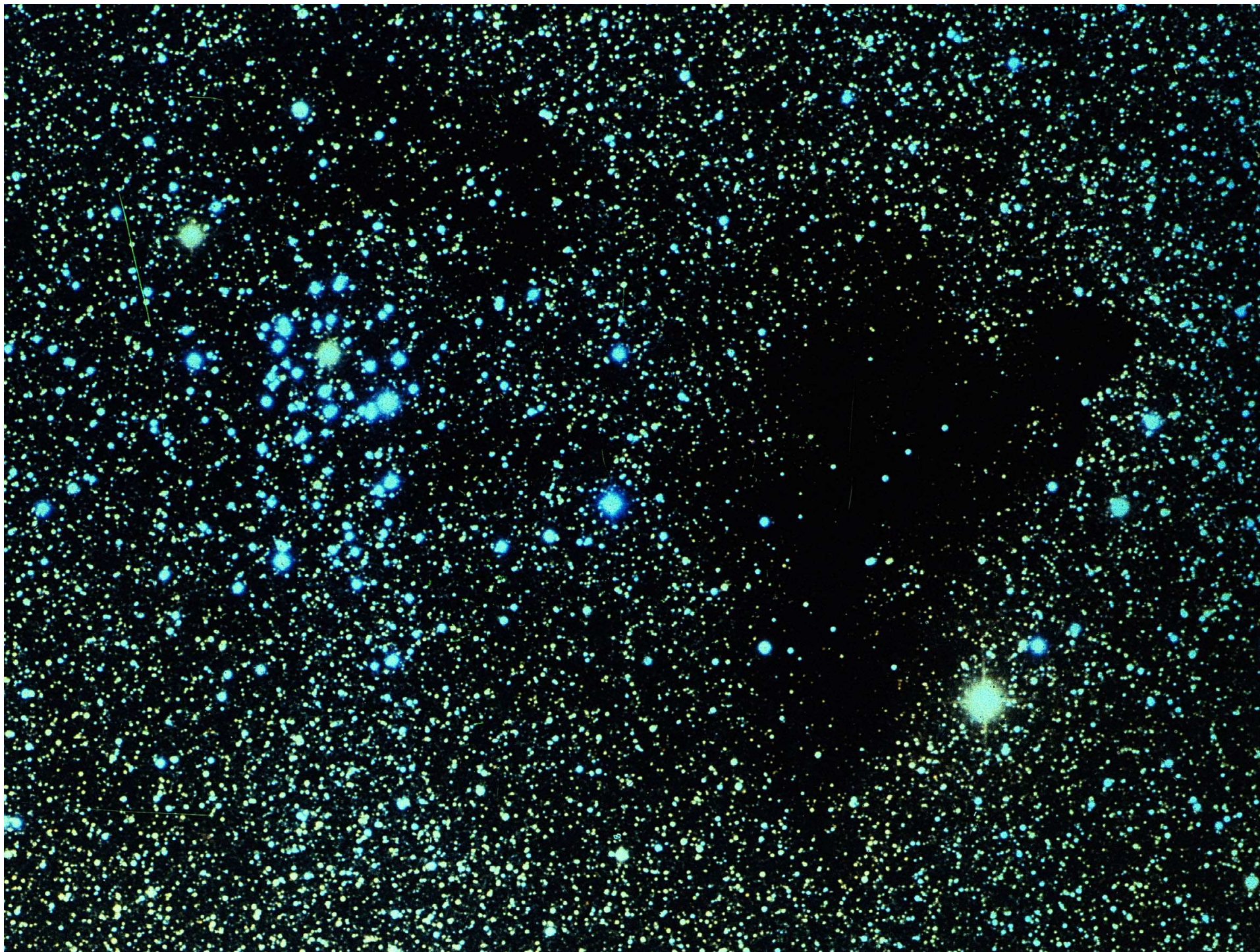
Quasi tutto quello che conosciamo in astrofisica è "invisibile"
→ Il nostro vedere è "indiretto", secondo diversi gradi...

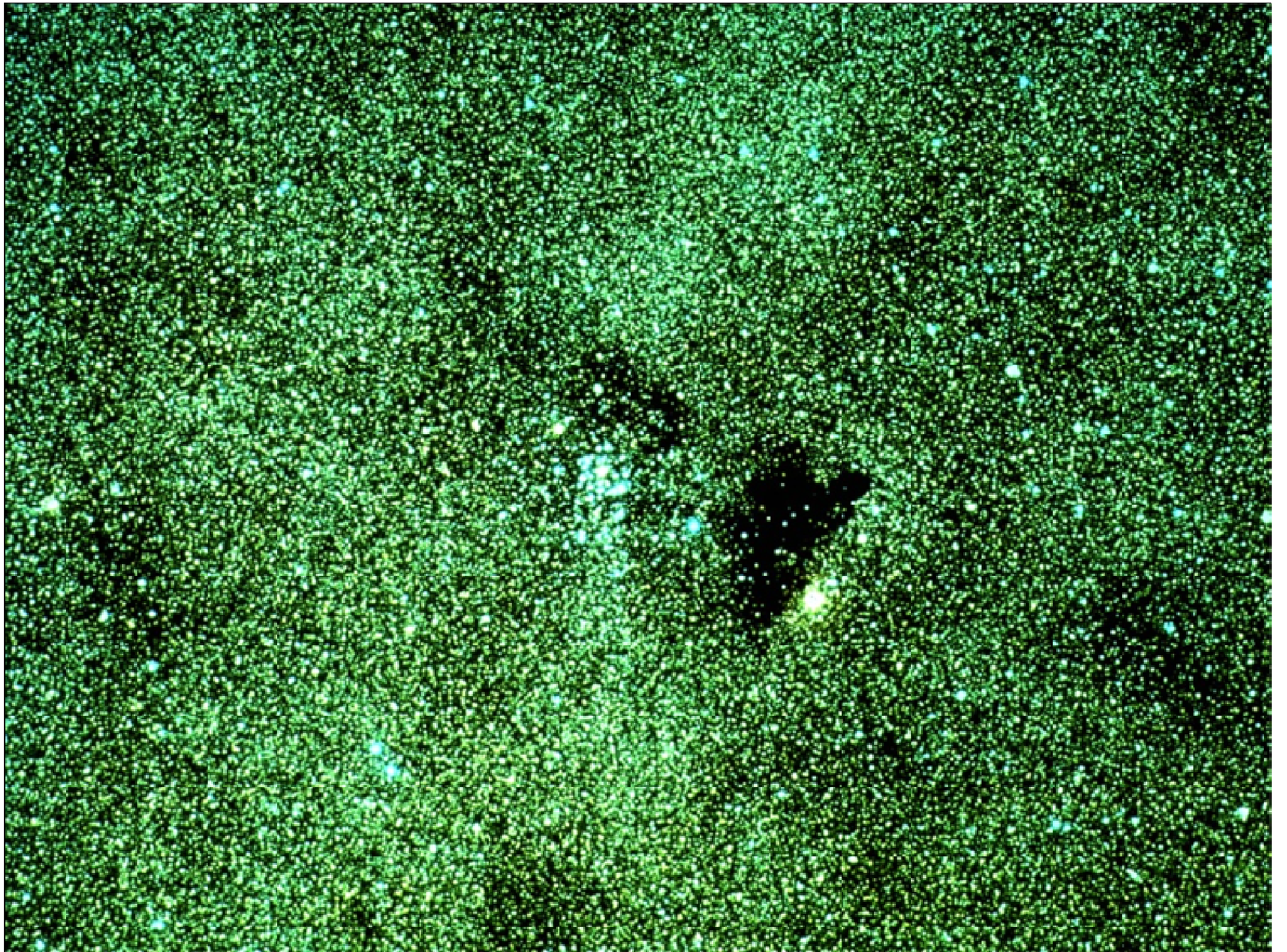


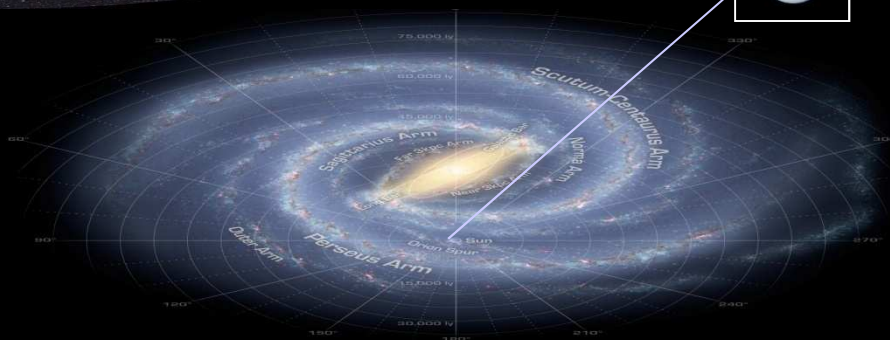
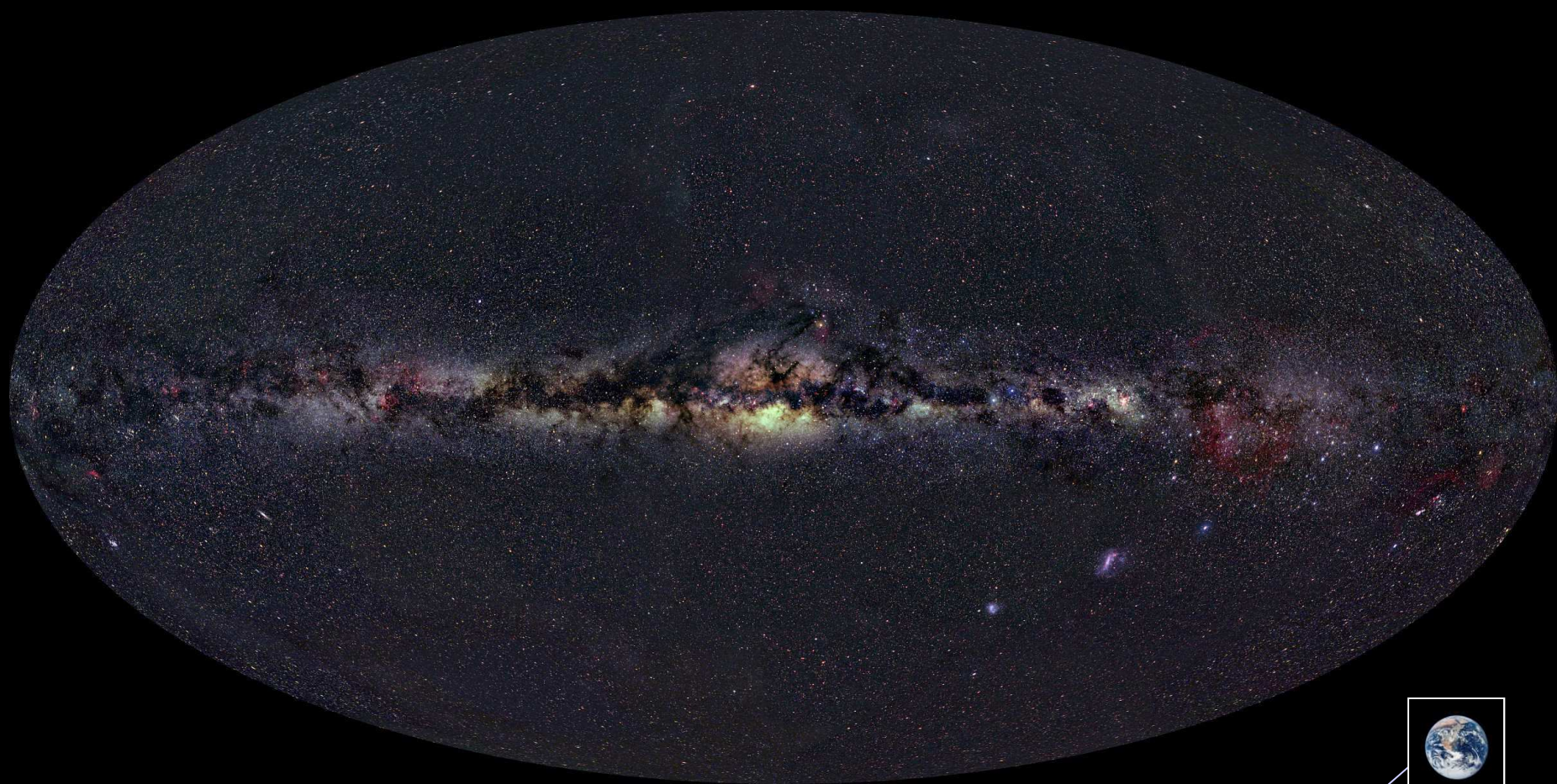
Galileo Galilei (1564 – 1642)

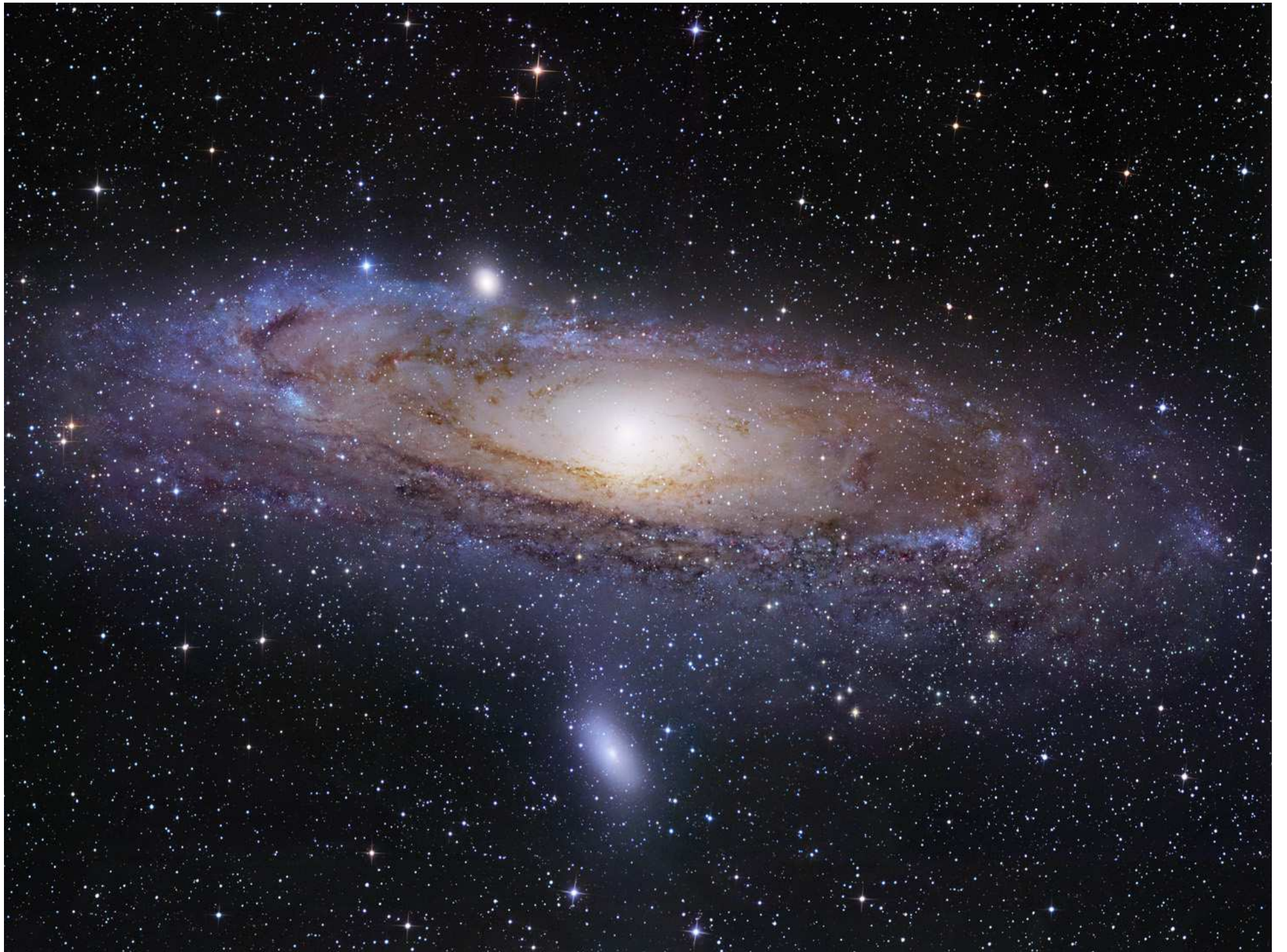


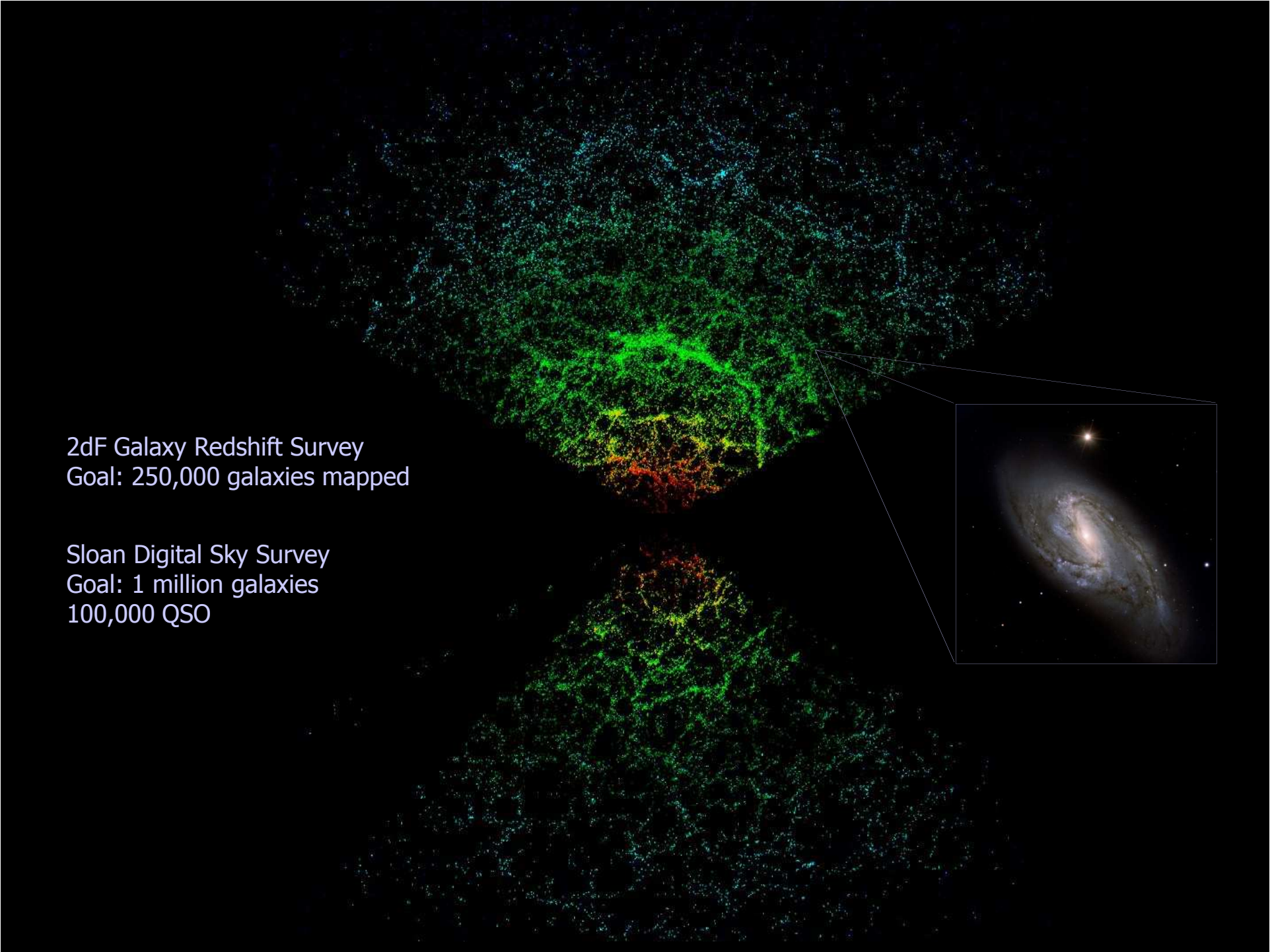
Hubble Space Telescope











2dF Galaxy Redshift Survey
Goal: 250,000 galaxies mapped

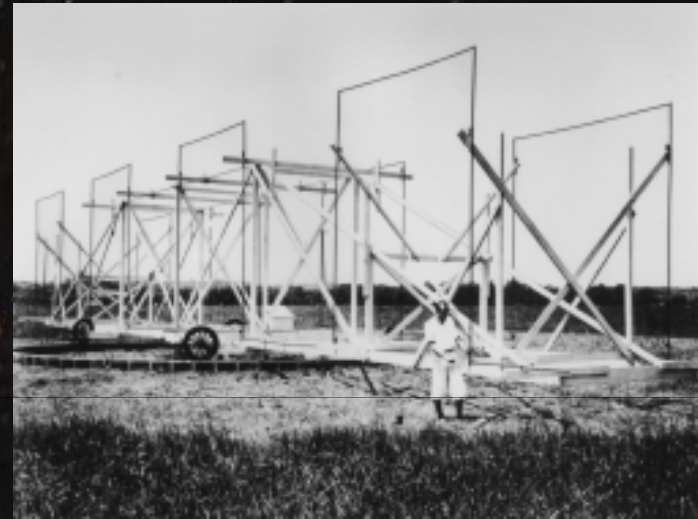
Sloan Digital Sky Survey
Goal: 1 million galaxies
100,000 QSO



La prima "astronomia dell'invisibile"

Segnali radio dal cielo

Karl G. Jansky
1928-33



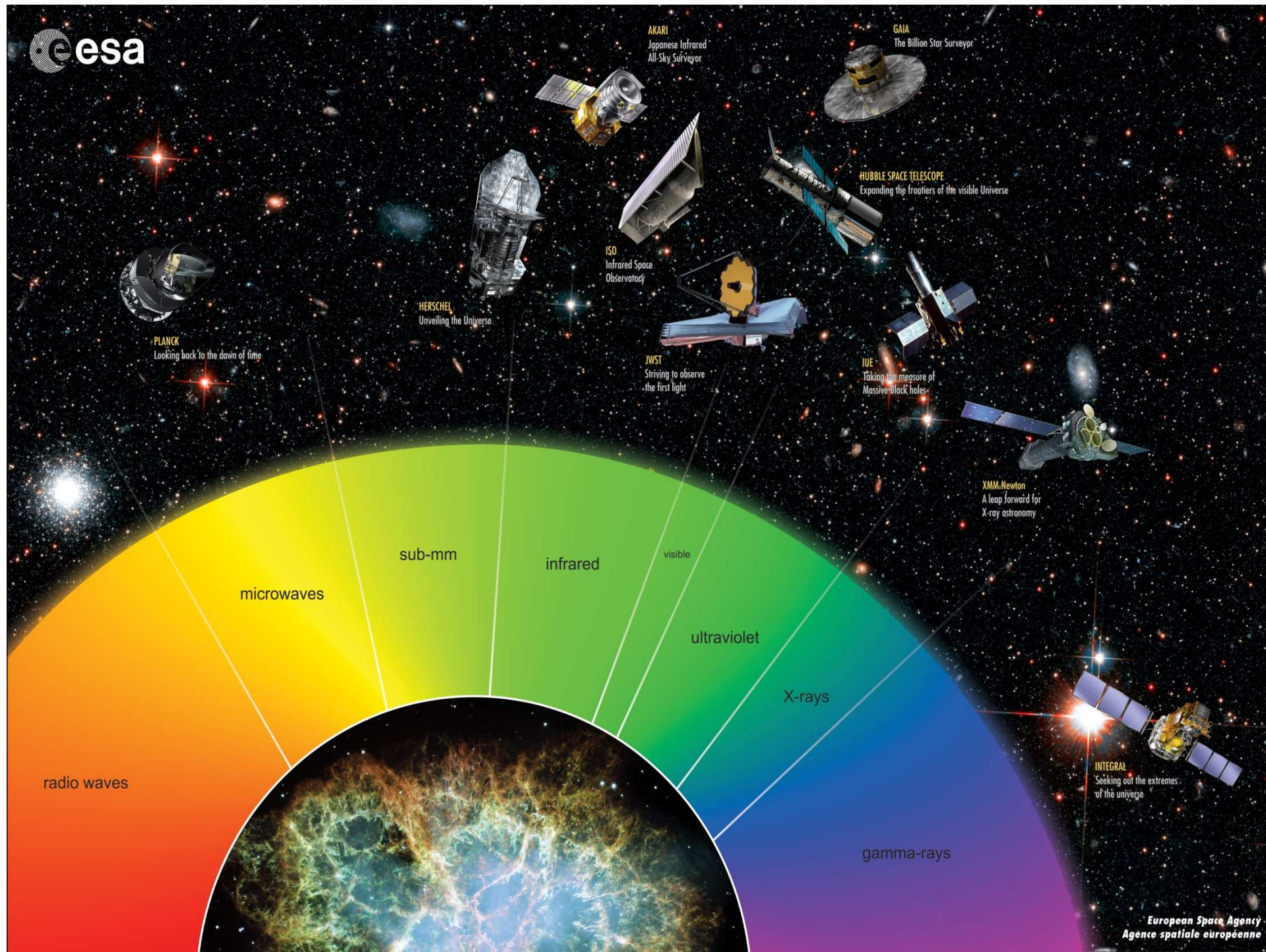
"Jansky's merry-go-round"

Bell Telephone Lab, Holmdel, NJ

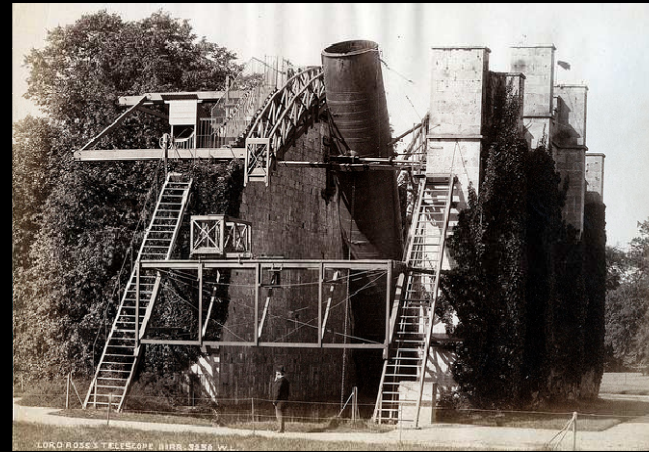
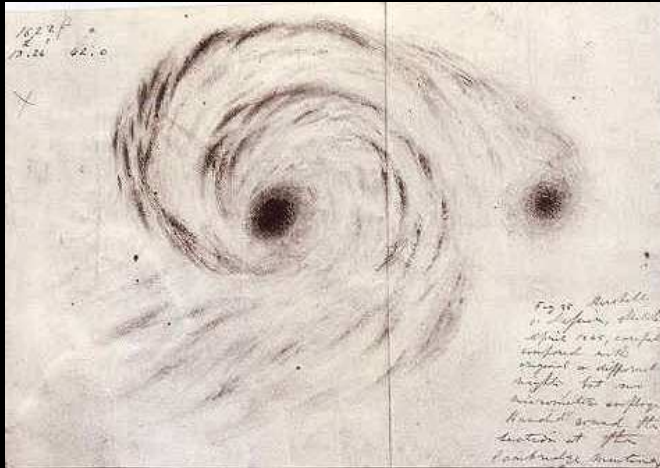
→ Studio dei disturbi radio ($\lambda \sim 10-20$ m)
per telecomunicazioni telefoniche

"a faint steady hiss of unknown origin"

Direzione del centro della Galassia, sincrona con il cielo



Imaging nel visibile

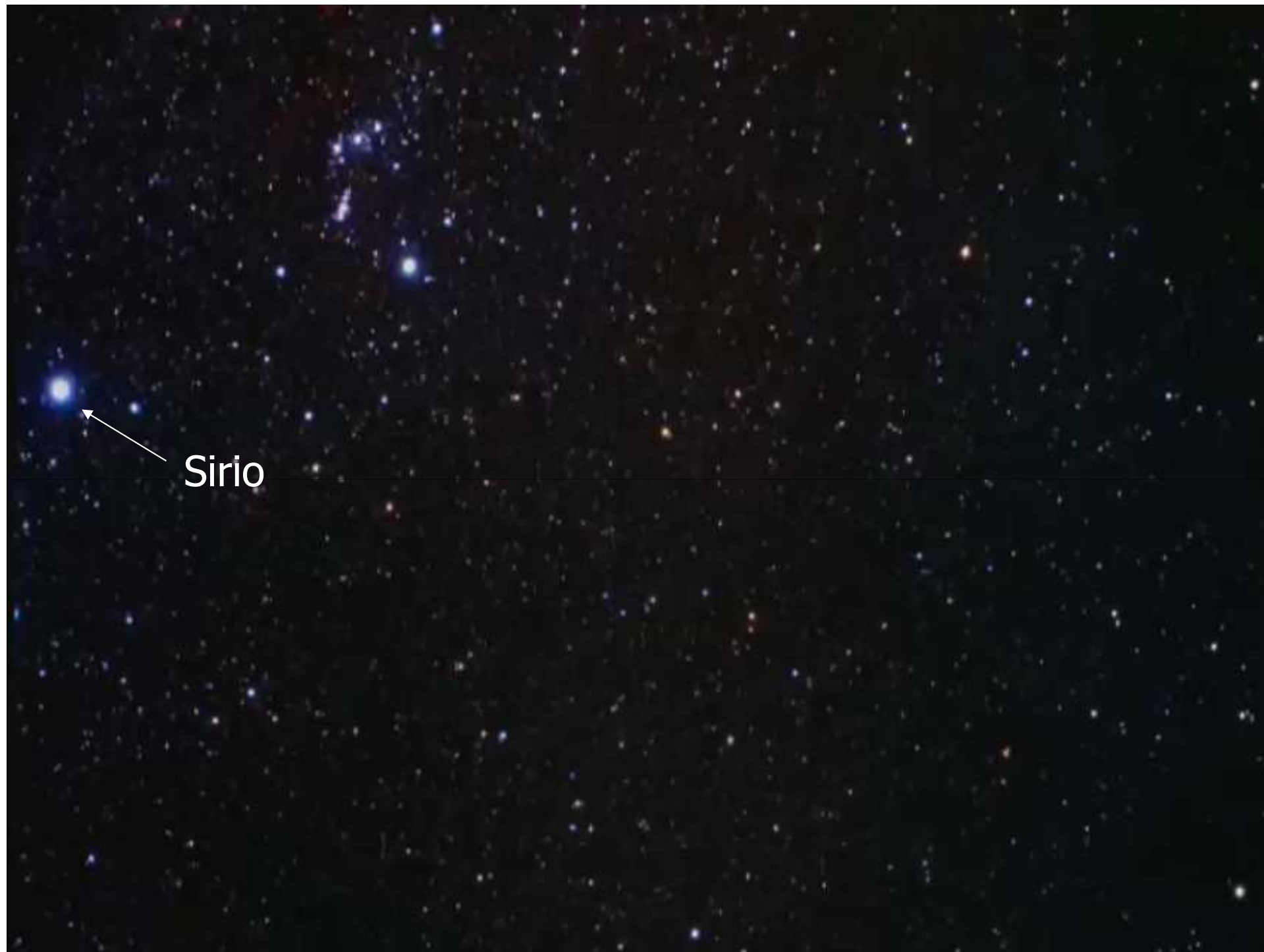


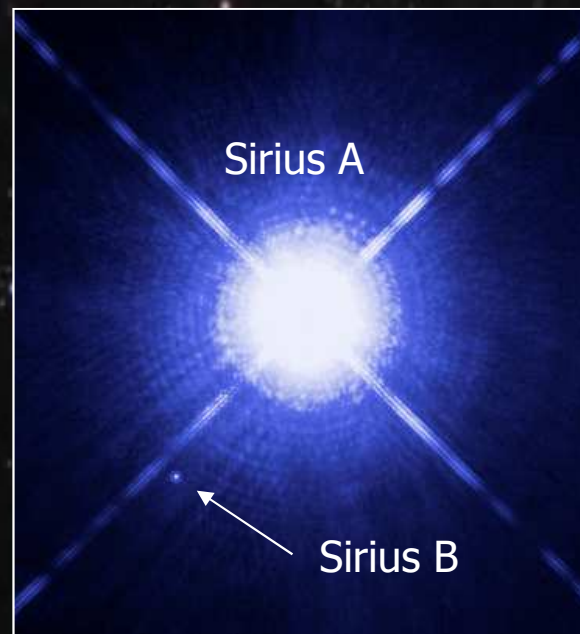
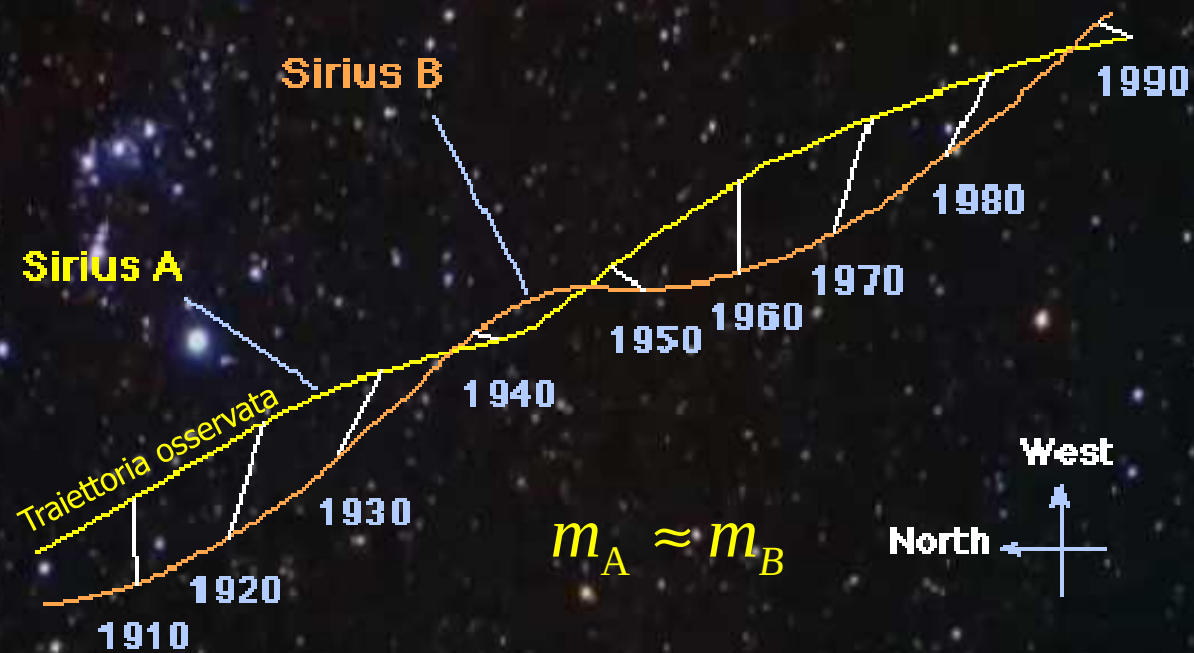
M51 - Lord Rosse, 72-inch telescope (1845)



M51 as seen by HST (2005)

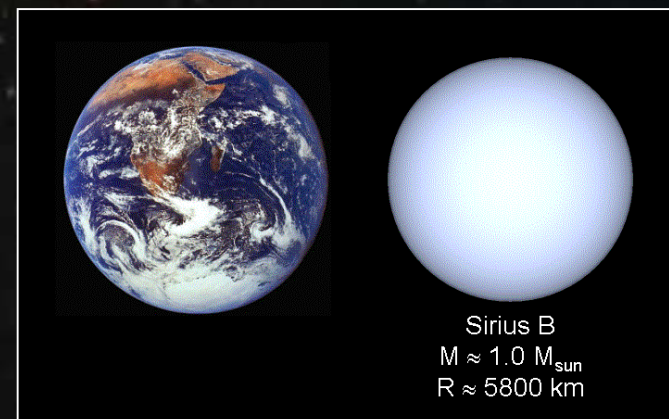
**Misure nel visibile sono altrettanto indirette di
quelle radio, X, gamma, ...**





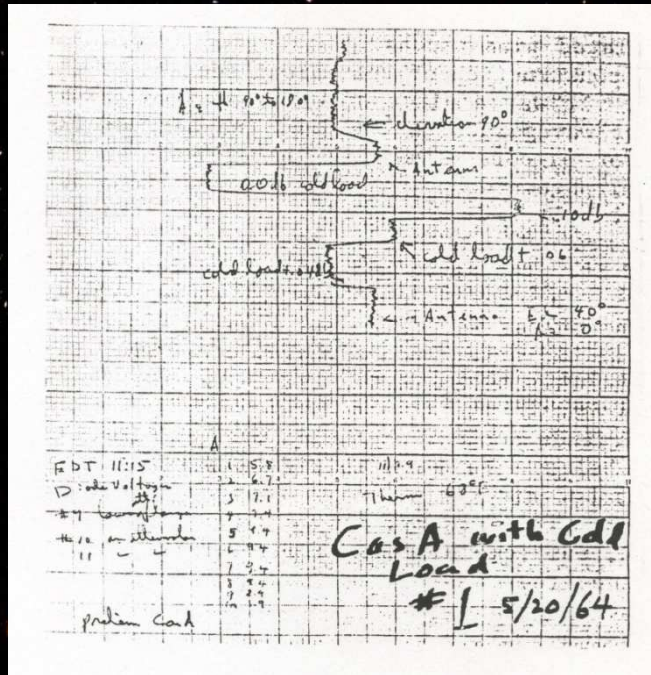
$$L_{\text{WD}} \approx 10^{-4} L_{\odot}$$

$$R_{\text{WD}} / R_{\odot} \propto (L_{\text{WD}} / L_{\odot})^{1/2} \approx 10^{-2}$$



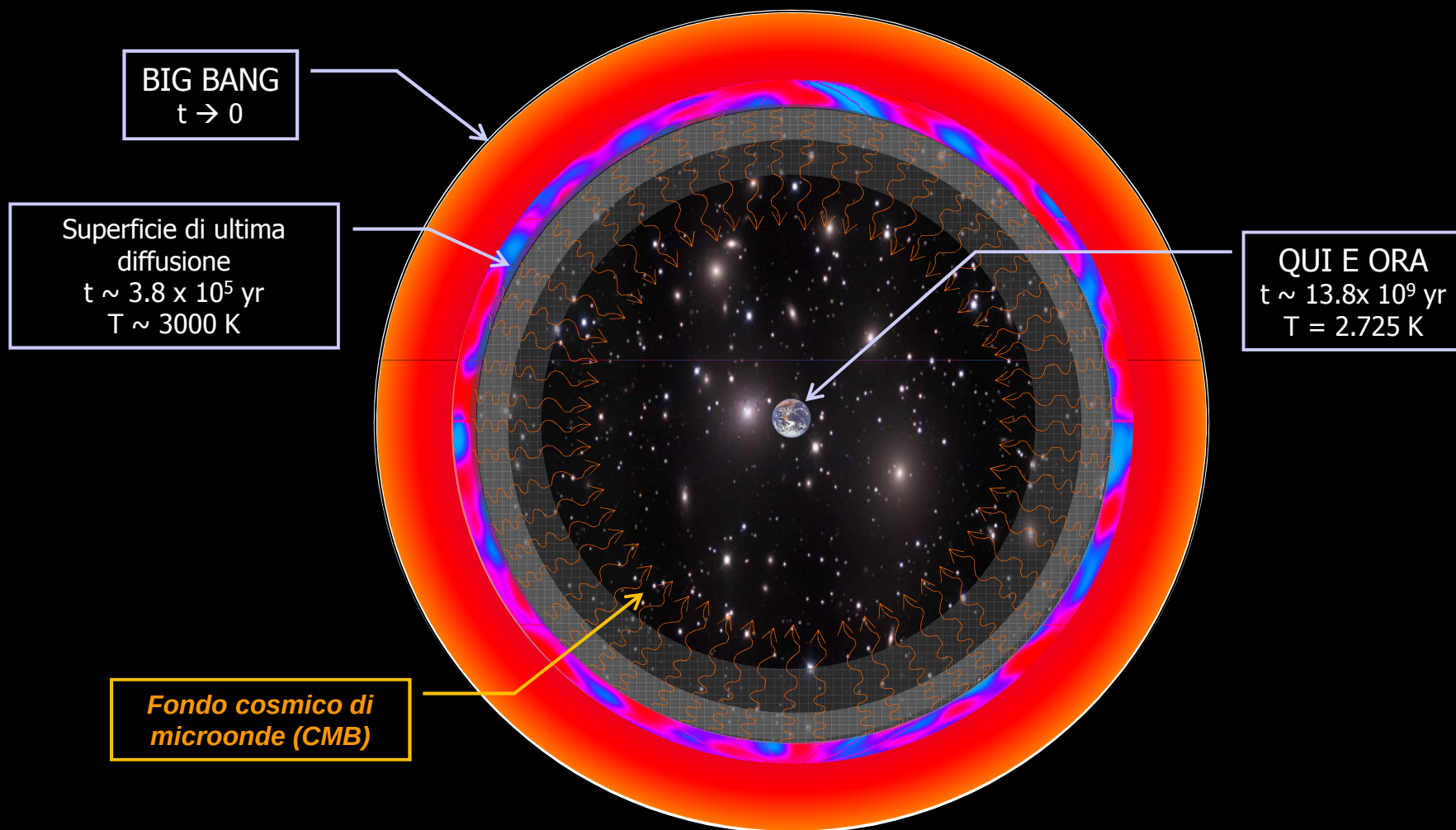






A. Penzias & R. Wilson
Premi Nobel per la Fisica 1978

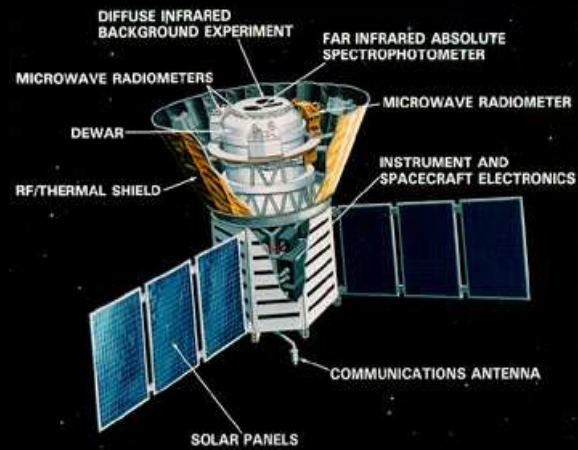
La prima luce dell'universo



Cosmic Background Explorer, 1992

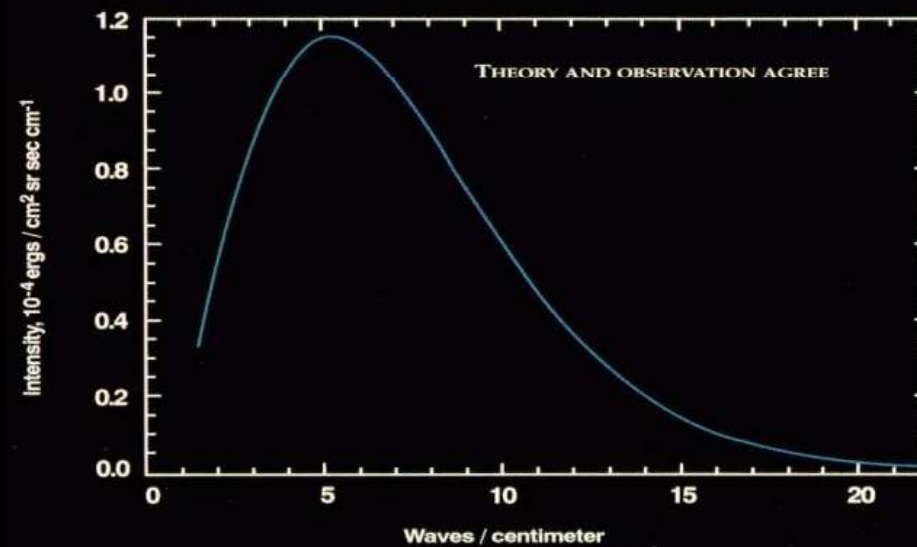


John C. Mather



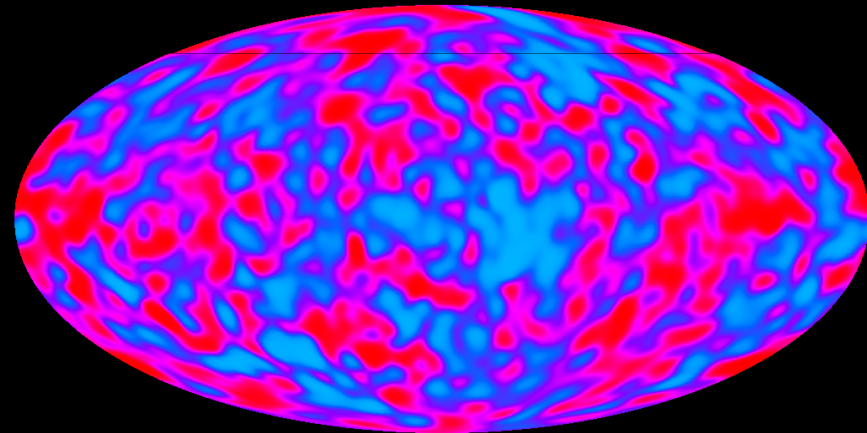
George F. Smoot

COBE-FIRAS



$$T_{\text{CMB}} \approx 2.7 \text{ K}$$

COBE-DMR



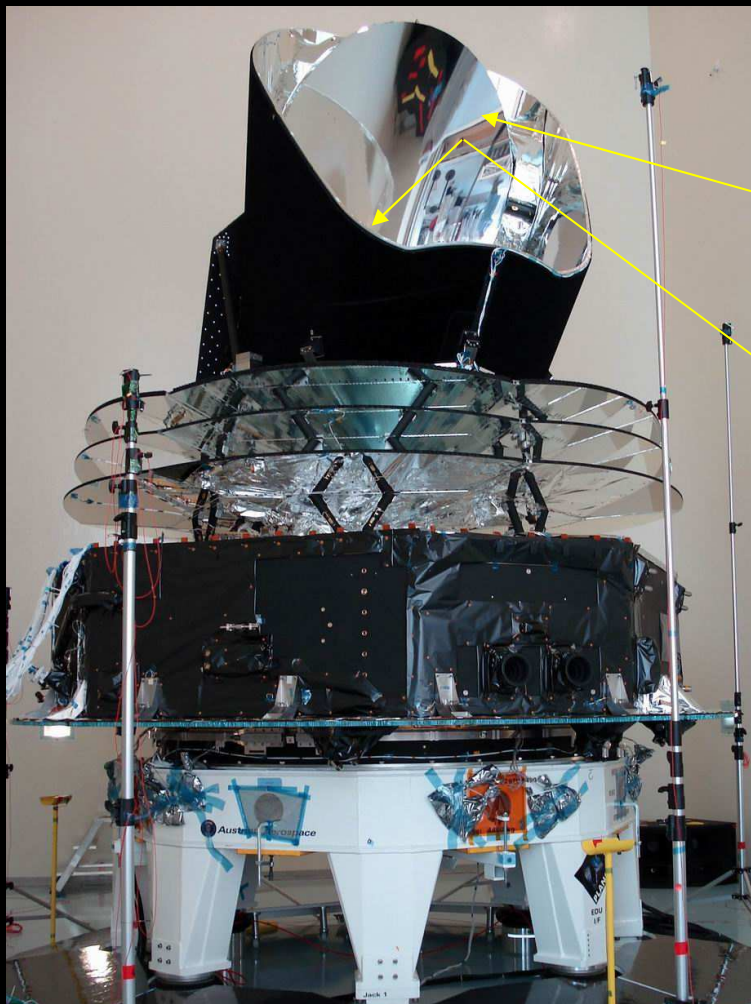
$$\frac{\Delta T}{T} \approx 10^{-5}$$



PLANCK



Looking back to the dawn of time



Planck Telescope
1.5x1.9m off-axis
Gregorian
 $T = 50\text{ K}$

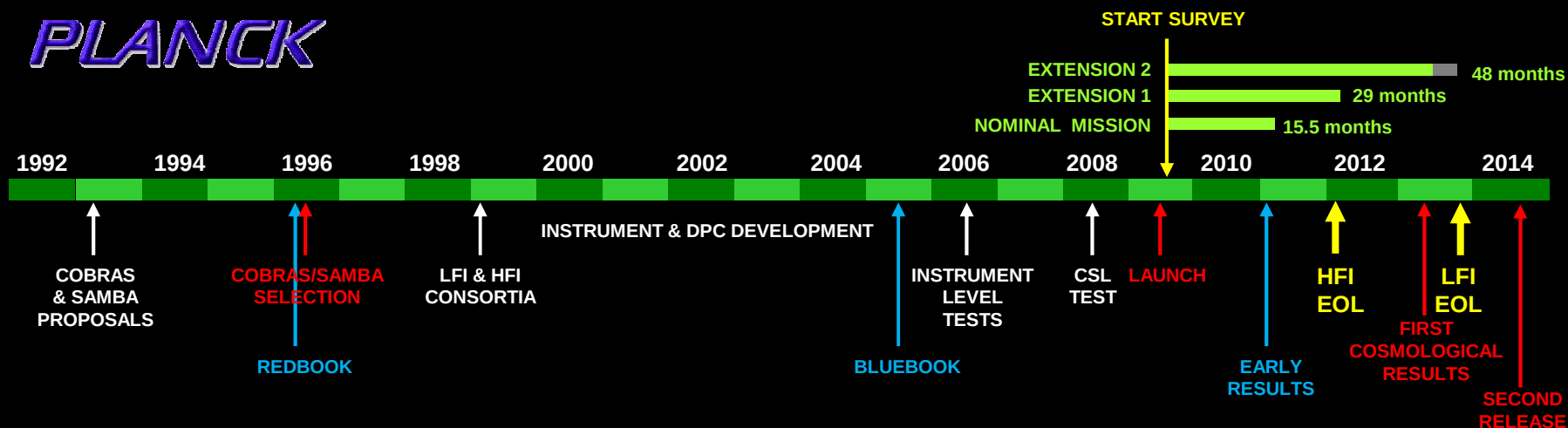


LFI Radiometers
27-77 GHz, $T = 20\text{ K}$

HFI Bolometers
100-850 GHz, $T = 0.1\text{ K}$



PLANCK

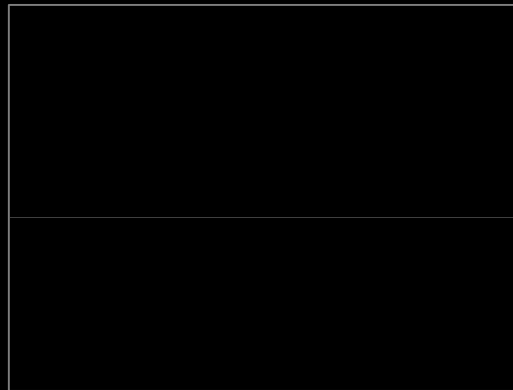


The Planck Collaboration



P. A. R. Ade, N. Aghanim, B. Aja, E. Alippi, L. Aloy, P. Arnaud, M. Arnaud, A. Aronson, A. Arredondo-Villanueva, E. Artal, E. Artina, A. Arts, M. Ashdown, J. Aumont, M. Azzaro, A. Bacchetta, C. Baccigalupi, M. Baker, M. Balasini, A. Balli, A. J. Banday, G. Barbier, R. B. Barreiro, M. Bartelmann, P. Battaglia, E. Battaner, K. Benabed, J.-J. Beney, R. Beneyton, K. Bennett, A. Benoit, J.-P. Bernard, P. Bhandari, R. Bhatia, M. Biggi, R. Boggiani, G. Billig, Y. Blanc, H. Blavot, J. J. Boek, A. Bonaldi, R. Bond, J. Bonis, J. Borrill, L. Boschini, F. Boulanger, J. Bouvier, M. Bouzidi, R. Bowman, E. Braglia, T. Bradshaw, M. Braglia, M. Bremer, D. Brienza, D. Broszkiewicz, C. Burigana, M. Burkhalter, P. Cabella, T. Carty, M. Catalano, S. Catinella, P. Camus, C. M. Cantalupo, B. Cappellini, J.-F. Cardoso, R. Carr, A. Catalano, L. Cayon, M. Cesa, M. Chaigneau, A. Challinor, A. Chamballu, J. P. Chambelland, M. Charra, L.-Y. Chiang, G. Chlewicki, P. R. Christensen, S. Church, E. Cianciotta, M. Cibrario, R. Cizneron, D. Clements, B. Collaudo, J.-M. Colley, S. Colombo, O. Corne, F. Couchot, B. Cougrand, A. Coullais, P. Couzin, B. Crane, B. Crill, M. Crook, D. Crumb, F. Cuttaia, U. D'Or, P. de Silva, R. Daddato, C. Damasio, L. Danese, G. d'Aquino, O. D'Arcangelo, K. Dassis, R. D. Davies, W. Davies, R. J. Davis, P. De Bernardis, D. de Chambure, G. de Gasperis, M. L. De la Fuente, P. De Paco, A. De Rosa, G. De Troia, G. De Troia, G. De Troia, M. Dehann, J. Delabrouille, J.-M. Delouis, F.-X. D'Esert, G. di Girolamo, C. Dickinson, E. Doelling, K. Dolag, I. Domken, M. Douspis, D. Doyle, S. Du, D. Dubruel, C. Dufour, C. Dumesnil, X. Dupac, P. Duret, C. Eder, A. Elfvig, T. A. Enßlin, P. Eng, K. English, H. K. Eriksen, P. Estaria, M. C. Falvello, F. Ferrari, F. Finelli, A. Fishman, S. Fogliani, S. Foley, A. Fonseca, G. Forma, O. Fornil, P. Fosalba, J.-J. Fourmond, M. Frailis, E. Franceschi, S. Franois, M. Frerking, M. F. Gomez-Renasco, K. M. Gorski, T. C. Gaiser, S. Galeotti, J. Gallegos, K. Ganga, J. Garcia Lazaro, A. Garnica, M. Gaspard, E. Gavila, M. Giardi, G. Giardino, G. Gienger, J. Giraud-Heraud, J.-M. Glorian, M. Grin, A. Gruppato, I. Guglielmi, D. Guichenon, B. Guillaume, P. Guillaudet, J. Haissinski, F. K. Hansen, J. Hardy, D. Harrison, A. Hazell, M. Hechler, V. Heckmann, D. Heizer, R. Hell, S. Henrot-Versille, C. Hernandez-Montenegro, D. Herranz, J. M. Hernandez, V. Hervier, A. Heske, A. Heurich, S. R. Hildebrandt, R. Hills, E. Hivon, M. Hobson, D. Holleri, W. Holmes, A. Hornstrup, W. Horvath, R. J. Hoyland, G. Huzy, K. M. Husenborger, N. Hughes, U. Isacsson, B. Jackson, A. Jae, T. R. Jae, T. Jagemann, N. C. Jessen, J. Jewell, W. Jones, M. Juvela, J. Kaplan, P. Karlman, F. Keck, E. Keihänen, M. King, T. S. Kisner, P. Kizilek, R. Kneissl, J. Knecht, L. Knox, T. Koch, M. Krassenburg, H. Kurki-Suonio, A. Lahteenmaki, G. Lagache, E. Lagorio, P. Lami, J. Lande, A. Lange, F. Langleit, R. Lapini, M. Lapolla, A. Lasenby, M. Le Jeune, J. P. Leahy, M. Lefebvre, F. Leyrand, G. Lemer, R. Leonardi, B. Leriche, C. Leroy, P. Leutenegger, S. M. Levin, P. B. Lilje, C. Lindensmith, M. Linden-Vornle, A. Loc, Y. Longval, P. M. Lubin, T. Luchik, I. Luthold, J. F. Macias-Perez, T. Maciaszek, C. MacTavish, S. Madden, B. Maei, C. Magneville, D. Maino, A. Mambretti, B. Mansoux, D. Marchioro, M. Maris, F. Mariani, J.-C. Marrucho, J. Marti-Canales, E. Martinez-Gonzalez, A. Martin-Polegre, P. Martin, C. Marty, W. Marty, S. Masi, M. Massardi, S. Matarrese, F. Matthai, P. Mazzotta, A. McDonald, P. McGrath, A. Mediavilla, P. R. Meinhold, J.-B. Melin, F. Melot, L. Mendes, A. Mennella, C. Mervier, L. Meslier, M. Miccolis, M.-A. Miville-Deschenes, A. Moneti, D. Montet, L. Montier, J. Mora, G. Morgante, G. Morigi, G. Morinaud, N. Morisset, D. Mortlock, S. Mottet, J. Mulder, D. Mursli, A. Murphy, P. Murphy, P. Musi, J. Narbonne, P. Naselsky, A. Nash, F. Nati, P. Natoli, B. Natterfield, J. Newell, M. Nexon, C. Nicolas, P. H. Nielsen, N. Ninane, F. Novello, D. Novikov, I. Novikov, I. J. O'Dwyer, P. Oldeman, P. Olivier, L. Ouchet, C. A. Osborn, L. Perez-Cuevas, L. Pagan, C. Paimo, F. Pajot, R. Paladini, F. Panzer, J. Panh, G. Paris, P. Parraud, B. Partridge, B. Parviri, J. P. Pascale, F. Pasian, D. P. Pearson, M. Pecora, O. Penderguez, L. Perotto, F. Perrotta, F. Piacentini, M. Pita, E. Pignatelli, O. Pienaar, E. Planck, S. Planck, P. Planck, F. Planck, G. Polenta, M. Ponthieu, L. Poppo, G. Poullet, J. Prutinen, G. Preziosi, L. Pradell, M. Prina, S. Prunet, J. P. Rachen, D. Rabin, F. Rame, I. Rasmussen, J. Rautakoski, W. J. Reach, R. Rebolo, M. Reinecke, J. Reiter, C. Renault, S. Ricciardi, P. Rideau, T. Riller, I. Ristorcelli, J. B. Riti, G. Rocha, Y. Roche, R. Roger Pons, R. Rolfs, D. Romero, S. Rosse, C. Rosset, S. Rouberol, M. Rowan-Robinson, J. A. Rubio-Martin, P. Rusconi, B. Rusholme, M. Salama, E. Salemo, M. Sandri, D. Santos, J. L. Sanz, L. Sauter, F. Sauvage, G. Savini, M. Schmelz, A. Schnoor, W. Schwarz, D. Scott, M. D. Seier, P. Shellard, C. Shih, M. Sias, J. I. Silk, R. Silvestri, R. Sippe, G. F. Smoot, J.-L. Starck, P. Stasi, J. Sternberg, F. Stivoli, V. Stolyarov, R. Stomp, L. Stringhetti, D. Strommen, T. Stute, R. Sudiwala, R. Sugimura, R. Sunyaev, J.-F. Sygnet, M. Turler, E. Taddei, J. Tallon, C. Tamiato, M. Taurigna, D. Taylor, L. Terenzi, S. Thuerey, J. Tillis, G. Tofani, L. Toolt, E. Tommasi, M. Tommasi, E. Tonazzini, J.-P. Torre, S. Tosti, F. Touze, M. Tristram, J. Tuovinen, M. Tuttlebee, G. Umana, L. Valenziano, D. Vallee, M. van der Vliet, F. Van Leeuwen, J.-C. Vanel, B. Van Tent, J. Varis, E. Vassallo, C. Vescovi, F. Vezzu, D. Vibert, P. Vielva, J. Viera, F. Villa, N. Vittorio, C. Vuerli, L. A. Wade, A. R. Walker, B. D. Wandelt, C. Watson, D. Werner, M. White, S. D. M. White, A. Wilkinson, P. Wilson, A. Woodcraft, B. Yoo, M. Yun, V. Yurchenko, D. Yvon, B. Zhang, O. Zimmermann, A. Zonca, and D. Zorita





Planck sky scanning (HD)





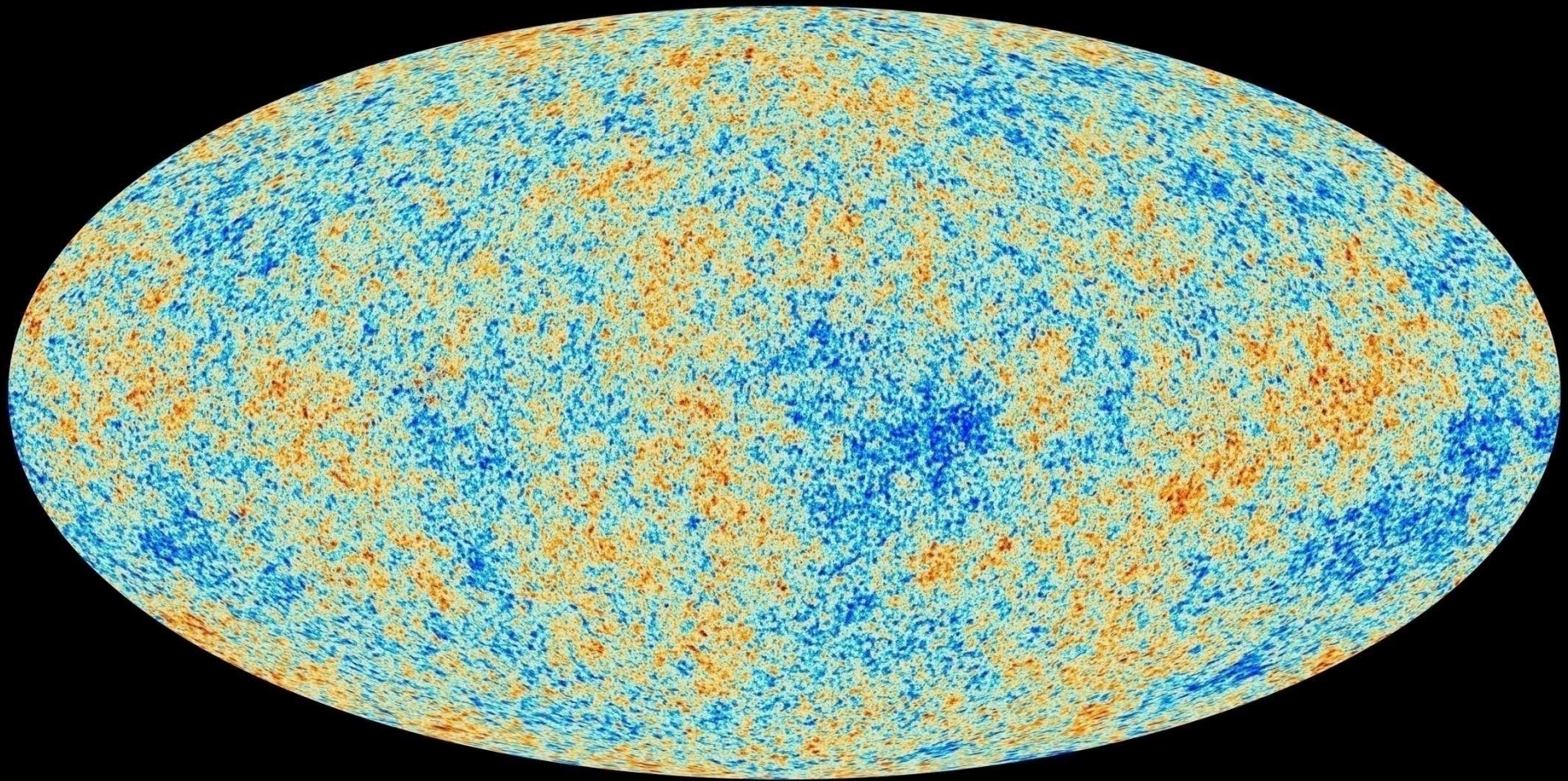
PLANCK



CNES

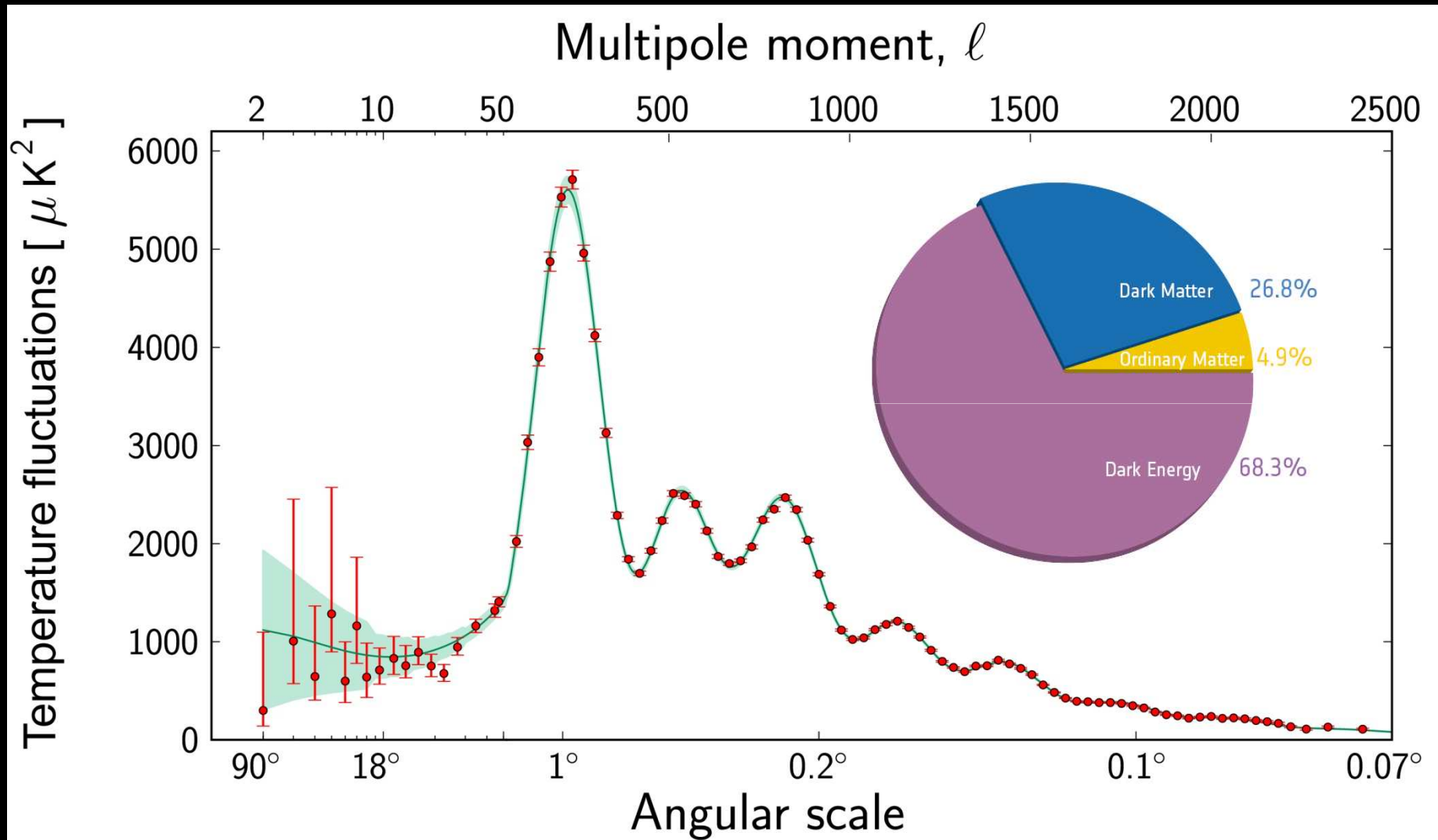
CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES

La prima luce dell'universo



$$t_R = 3.8 \times 10^5 \text{ yr} \quad \frac{\delta T}{T} \approx \frac{\delta \rho}{\rho} \approx 10^{-5} \quad t_{\text{infl}} \approx 10^{-35} \text{ s}$$

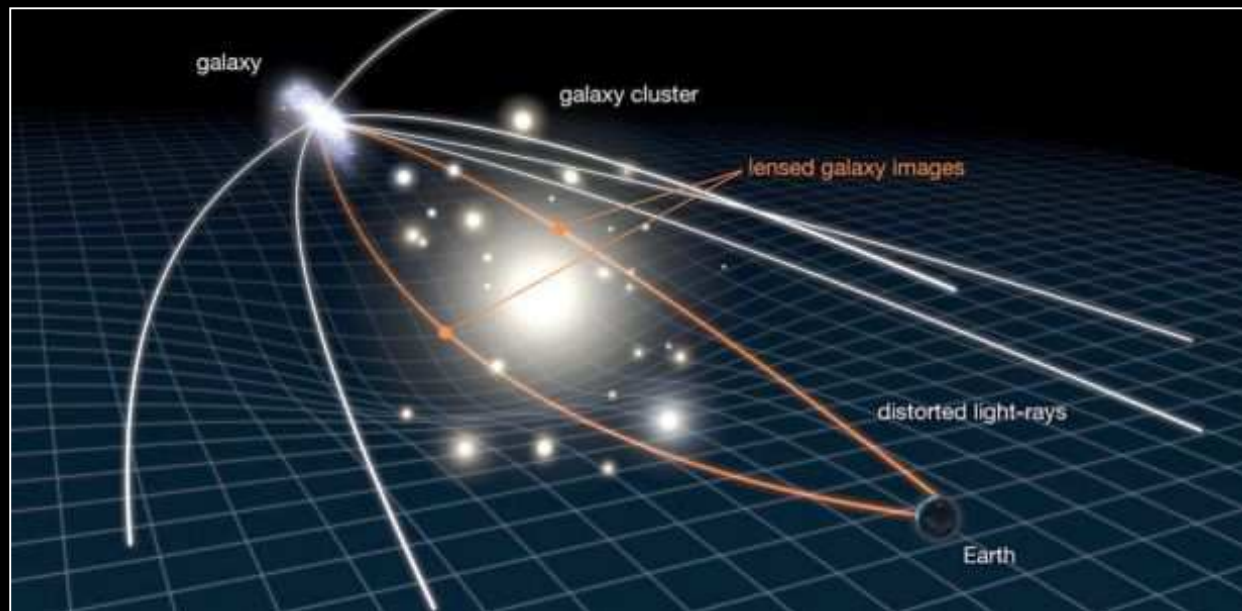
Musica primordiale



$$t_U = 13.82 \pm 0.05 \text{ Gyr}$$

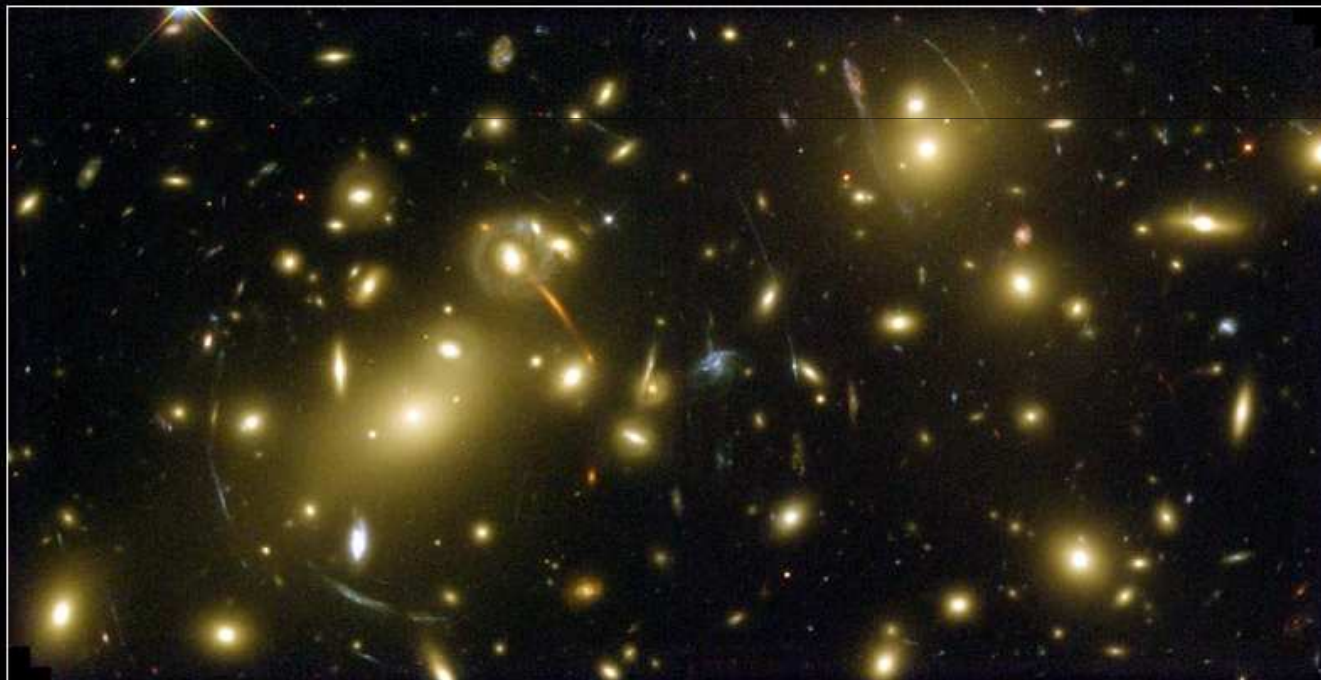
Come è distribuita la materia (*invisibile!*) nell'universo?

Lensing gravitazionale



Come è distribuita la materia (*invisibile!*) nell'universo?

Lensing gravitazionale



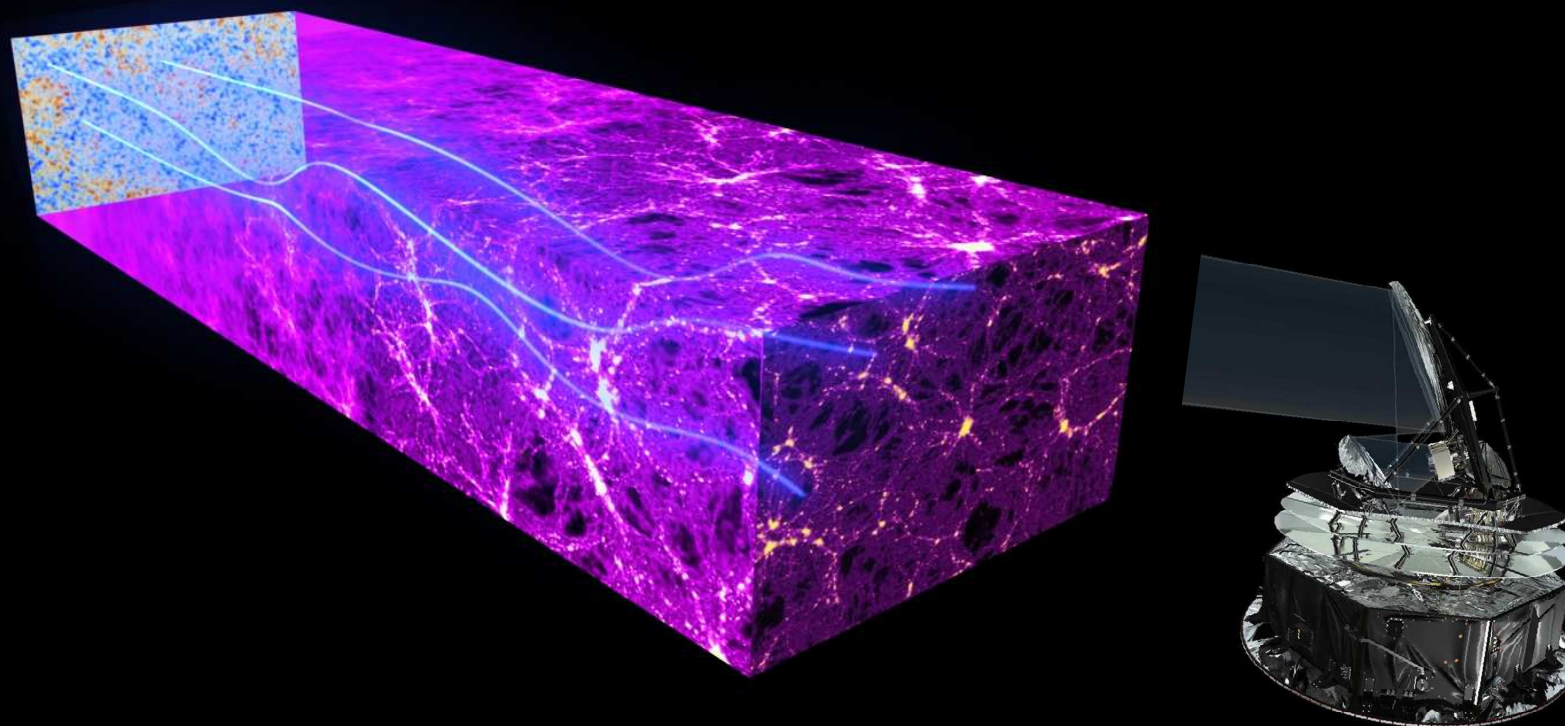
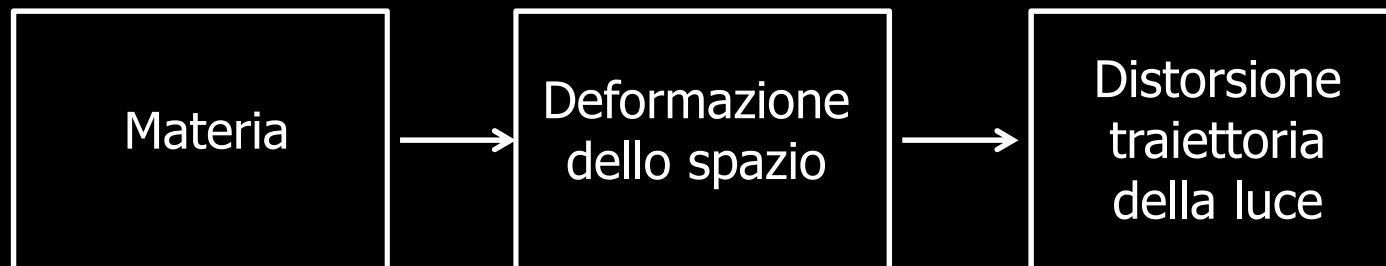
Galaxy Cluster Abell 2218

HST • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-08

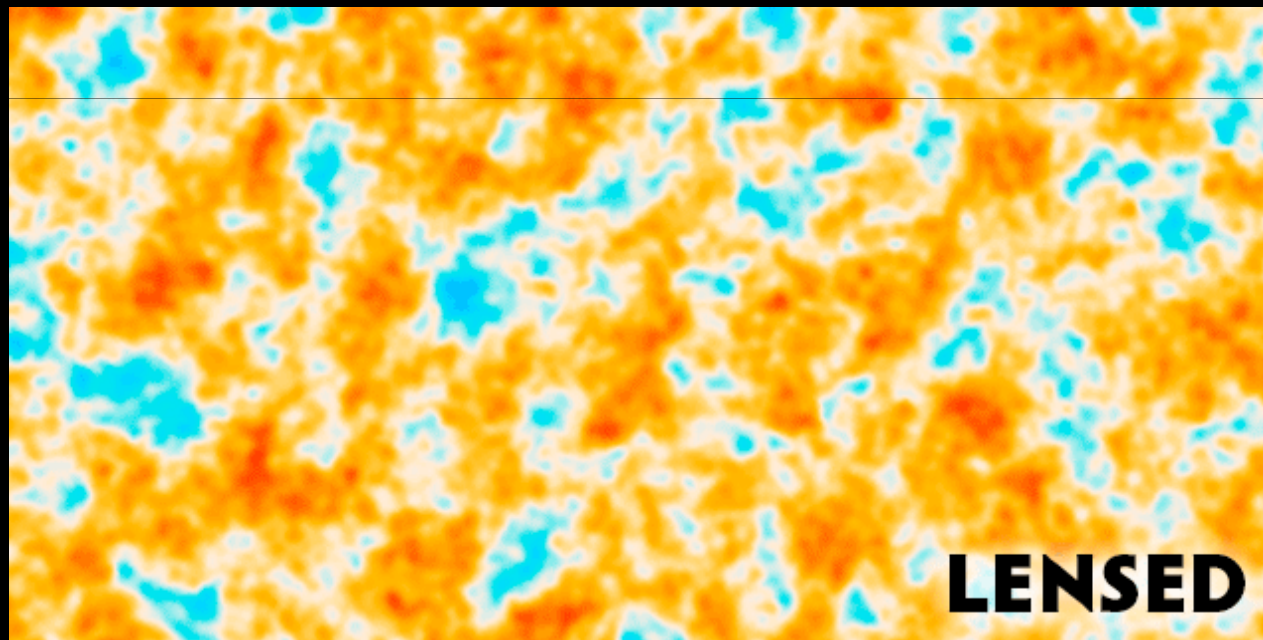
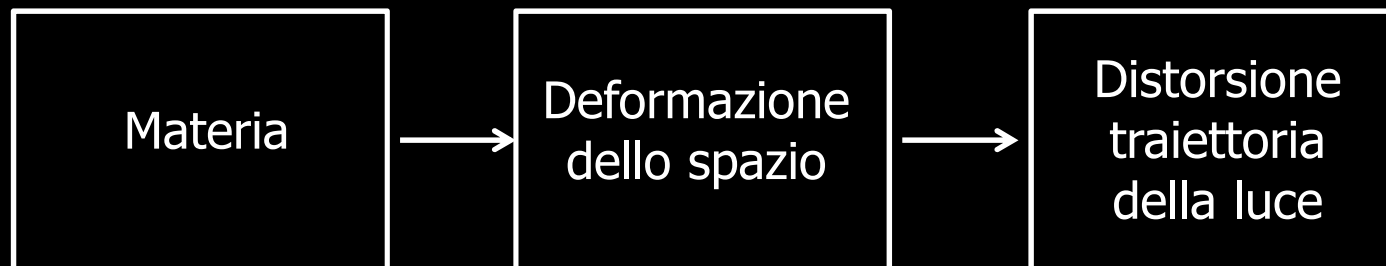
Come è distribuita la materia (*invisibile!*) nell'universo?

Lensing gravitazionale

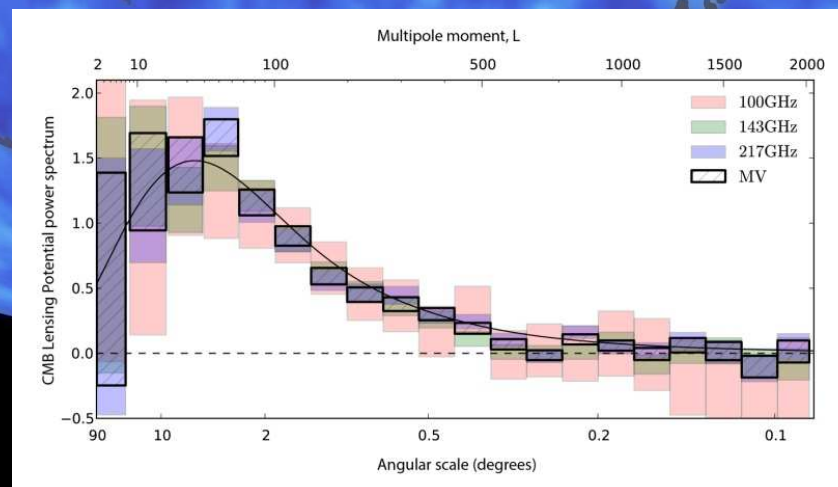
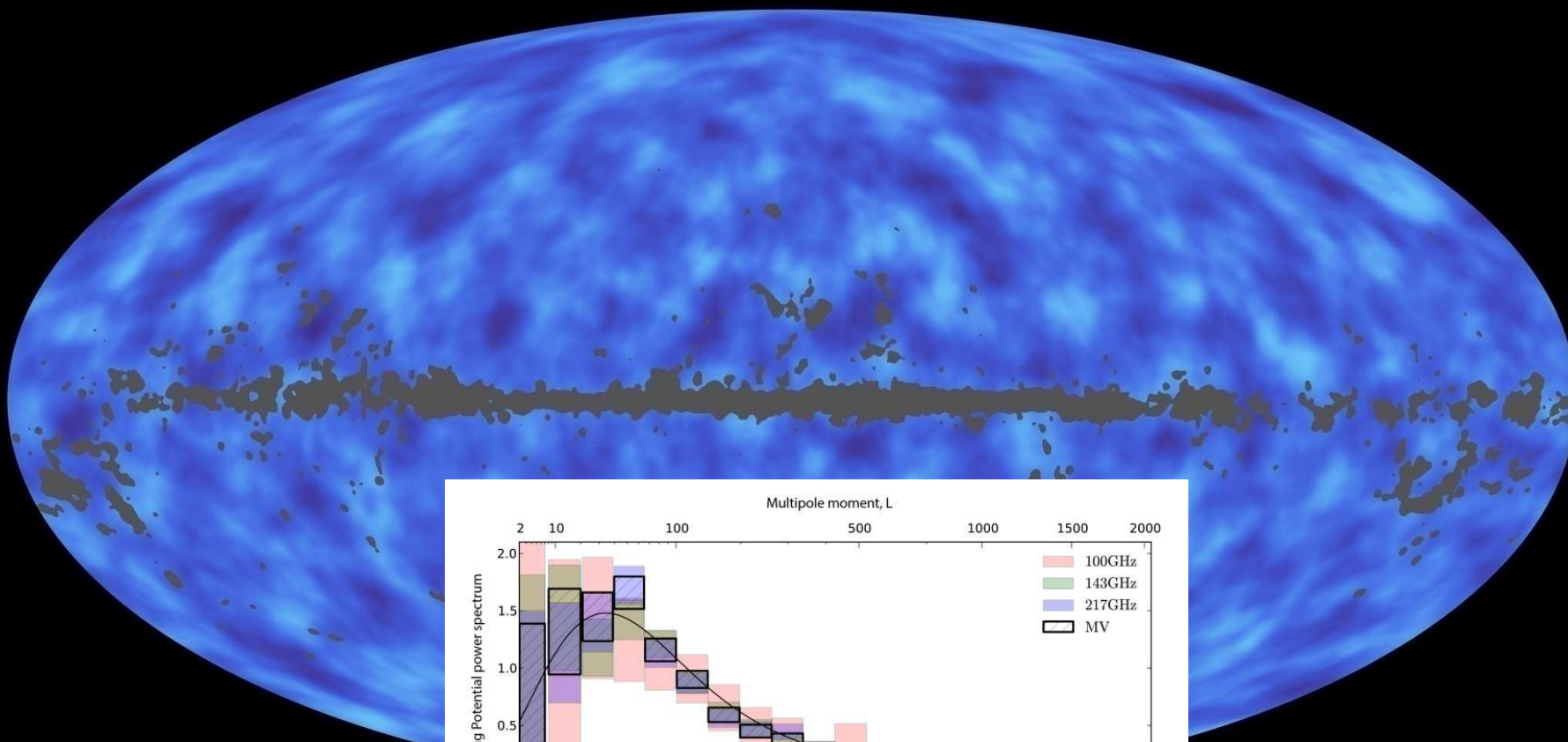


Come è distribuita la materia (*invisibile!*) nell'universo?

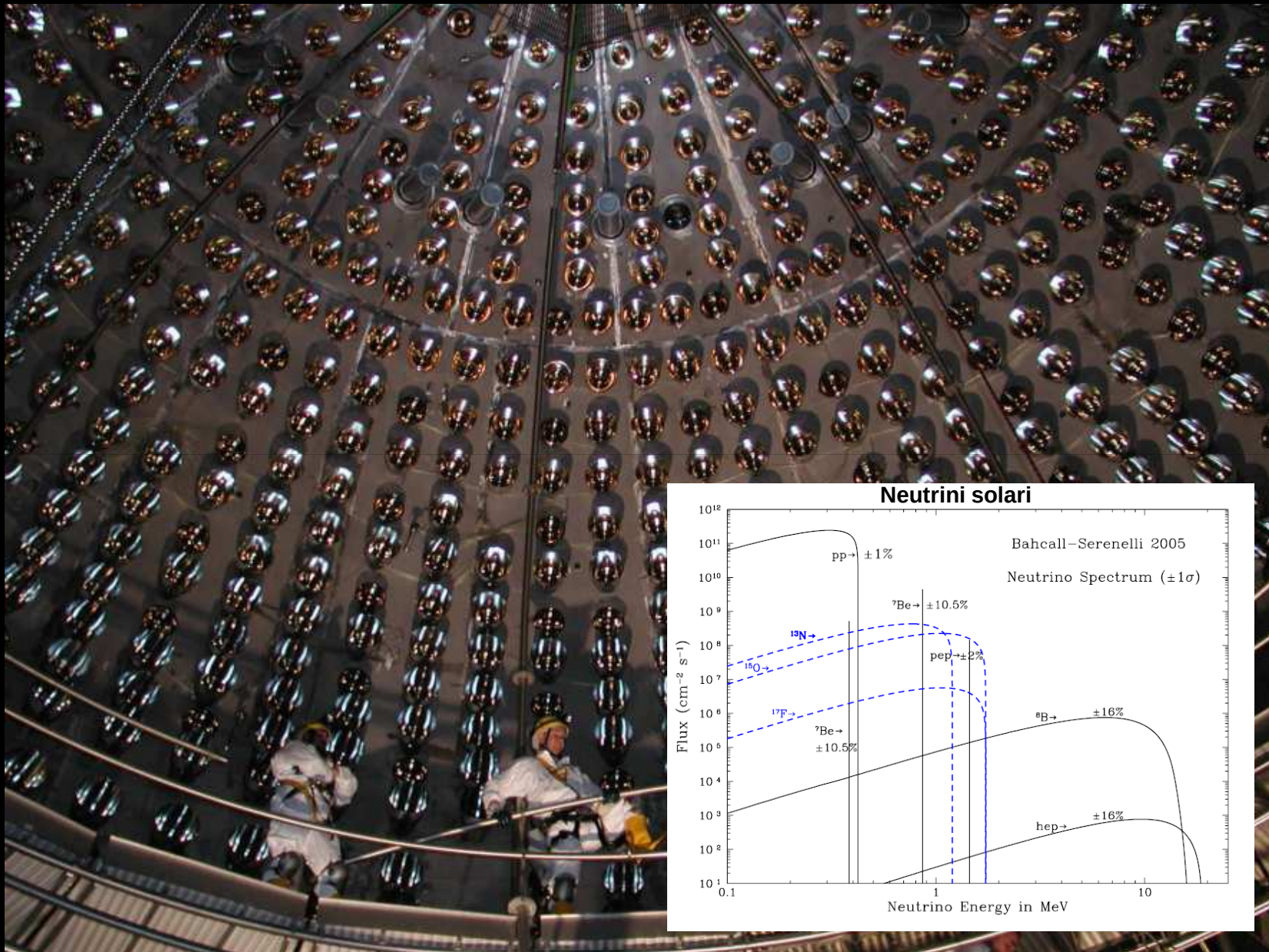
Lensing gravitazionale



La prima mappa della distribuzione globale della materia nell'universo accessibile

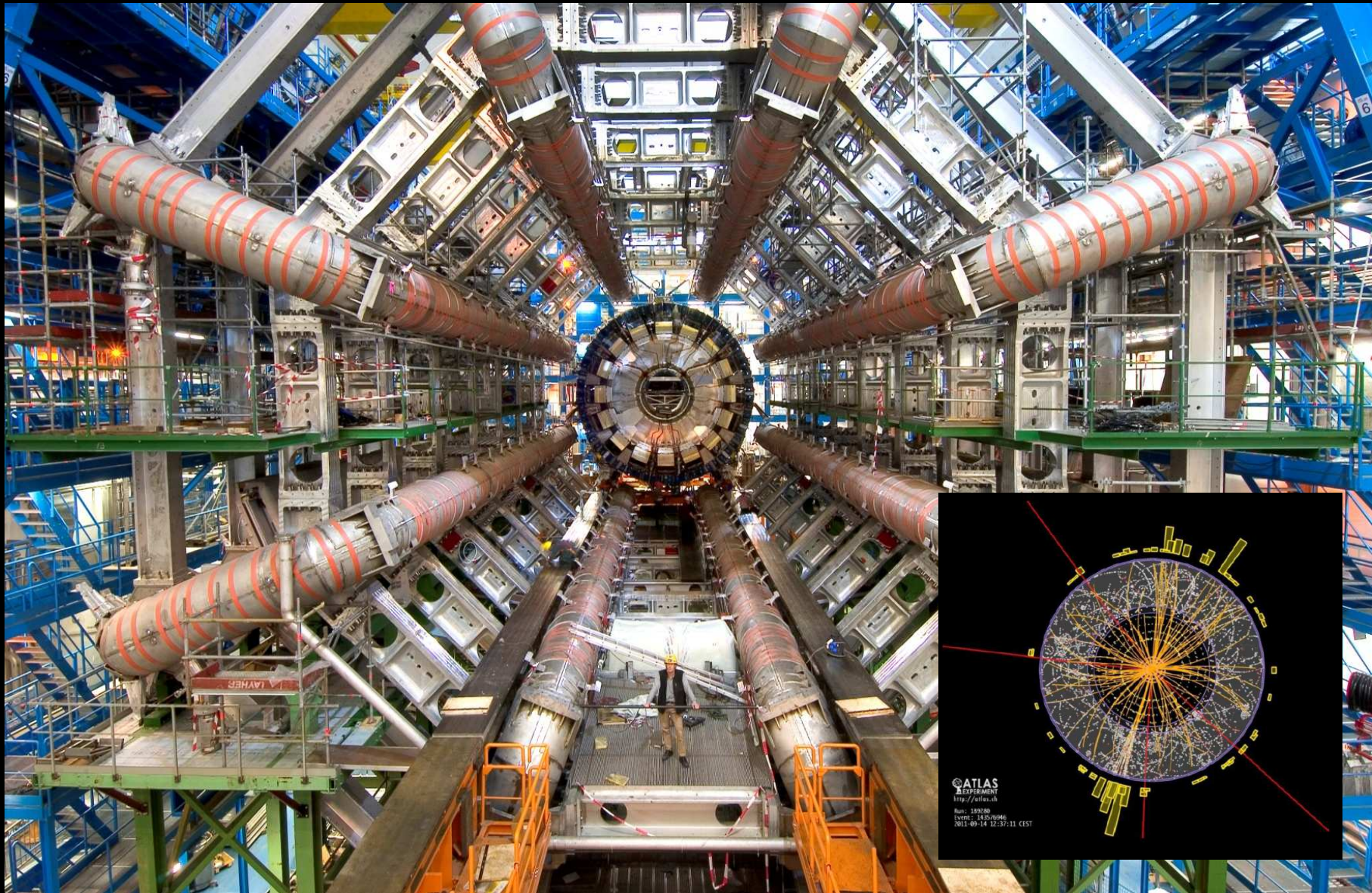


“Vedere” i neutrini



Borexino – Laboratori Nazionali del Gran Sasso

“Vedere” i bosoni di Higgs



ATLAS – Larga Hadron Collider (CERN)

$$t \approx 10^{-9} \text{ s}$$

Vedere l'invisibile

Quasi tutto quello che conosciamo in astrofisica è "invisibile", e lo conosciamo per via "indiretta":

- Sorgenti troppo deboli per essere viste direttamente
- Emissione in regioni spettrali al di fuori del visibile
- Visibili per effetti gravitazionali (*dark matter, dark energy*)
- Astrofisica dei neutrini, particelle elementari, ...
- "Vediamo" (indirettamente) le leggi di natura (realtà immateriale)?

NB - Anche ciò che è visibile "direttamente" è in qualche modo "mediato" da un processo fisico (luce, ricezione della retina, ...)

Quando noi diciamo di "aver visto" qualcosa?

→ Quando catturiamo un "segnale *significativo*"

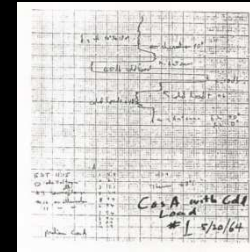
"Vedere" in senso compiuto ("scoperta") implica qualche tipo di "riconoscimento" di ciò che si vede

Come ci rendiamo conto del significato di ciò che vediamo?

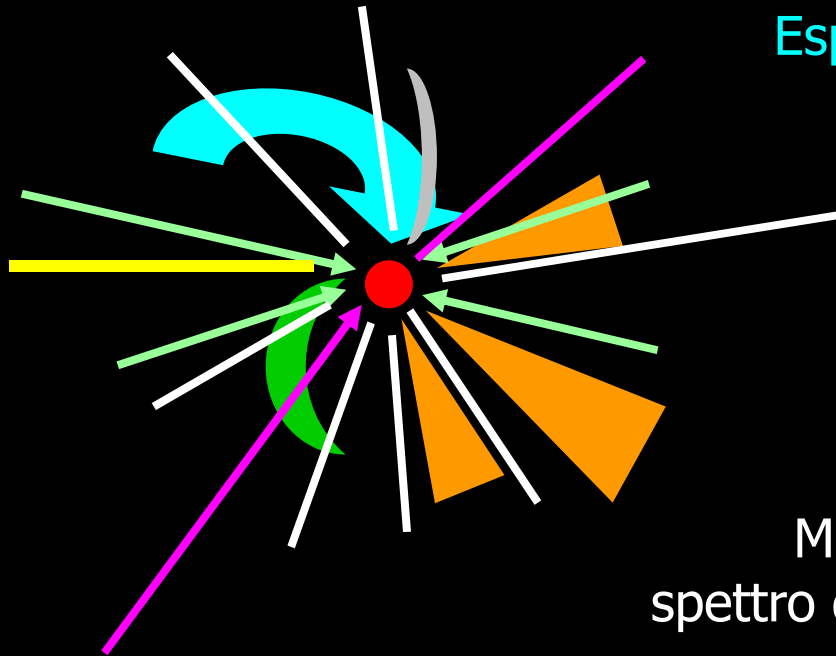
indizi convergenti

Vediamo una luce, un segnale. Ma "che cosa" vediamo?
Esempio: fondo di microonde

Scoperta del fondo cosmico di microonde (1965)



Espansione cosmica (1929)



Spettro BB del Fondo Cosmico (1989)
Anisotropia del Fondo Cosmico (1992)

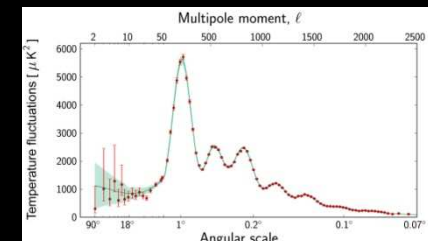
Effetto SZ

$T_{\text{CMB}}(z)$ (1995)

Misure di precisione dello
spettro di potenza (2000-2013)

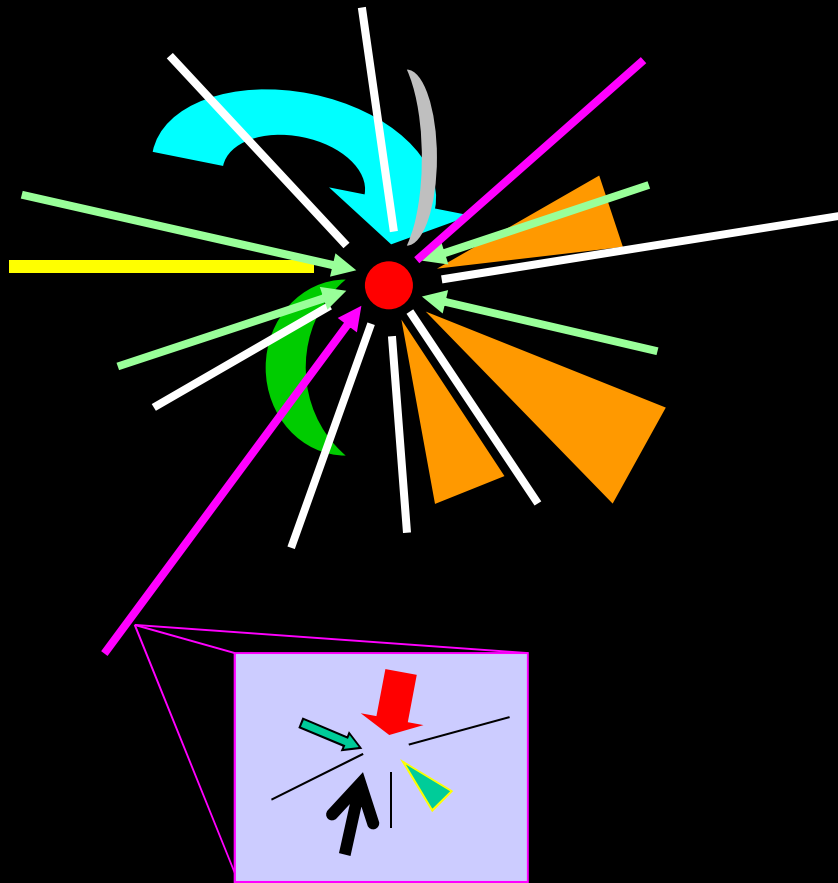
Gravitational lensing (2013)

Polarizzazione e correlazione con anisotropie (2005-2013)



E' la prima luce dell'universo!

Una "scoperta" emerge e si consolida nel tempo,
come spiegazione "invisibile" di molti indizi "visibili",
tra loro indipendenti

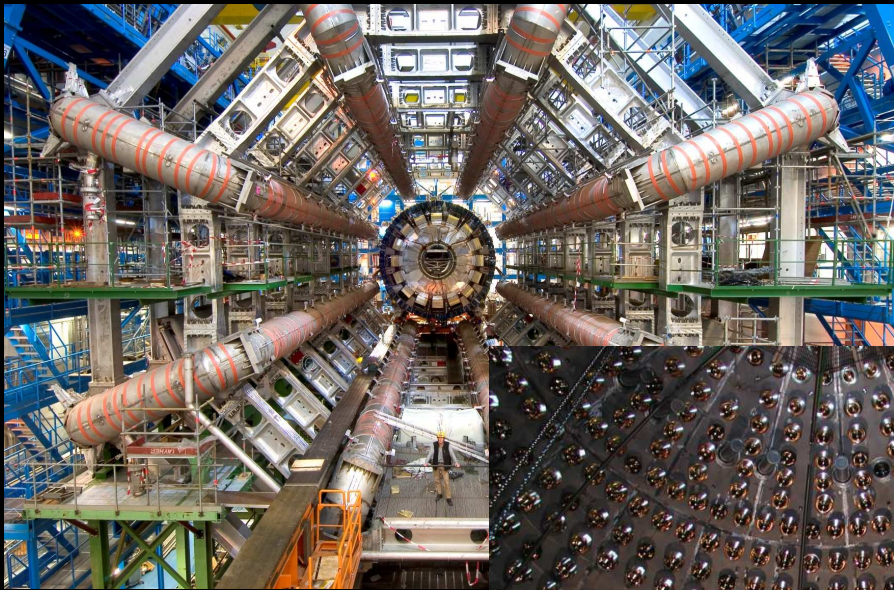


- Ognuno di essi è a sua volta l'esito di una serie di indizi "di ordine inferiore"
- Nel metodo scientifico il livello elementare della catena *tende a* ricondursi a una misura o osservazione quantitativa, rigorosa, **verificabile**, ripetibile
- Ogni misura ha una sua incertezza caratteristica, la cui conoscenza è essenziale per l'utilità della misura
- Ad ogni passo, il giudizio del soggetto umano (obbedienza al dato) è necessario

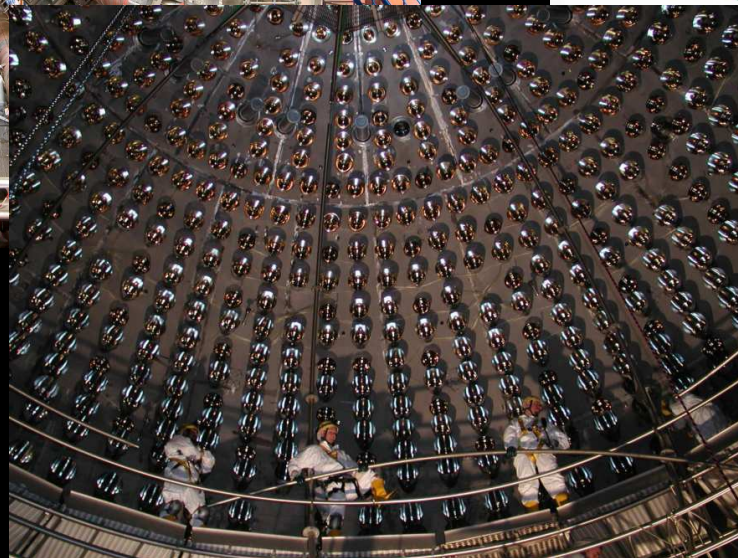
Come indagare il cosmo: Vedere l'invisibile

Grandi esperimenti, grandi collaborazioni

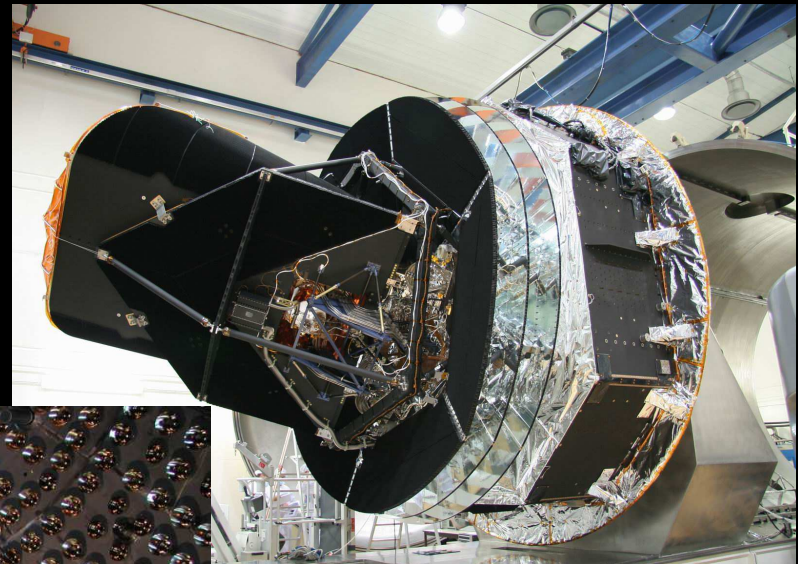
- Non è il singolo ricercatore a "vedere" l'esito dello strumento
- Solo una relazione tra persone consente di procedere
- Sfida per il futuro



Atlas - LHC



Borexino



Planck