

Quel est le contenu de notre Univers ?

Quel est le contenu de notre Univers ?

Il y a \sim 1 siècle

Aujourd’hui

Quel est le contenu de notre Univers ?

Il y a ~1 siècle

Aujourd’hui

L'univers est constitué d'étoiles, de gaz, de poussières, de planètes, ...

Le tout formant des galaxies, qui elles mêmes forment des amas.

« Matière ordinaire »

Quel est le contenu de notre Univers ?

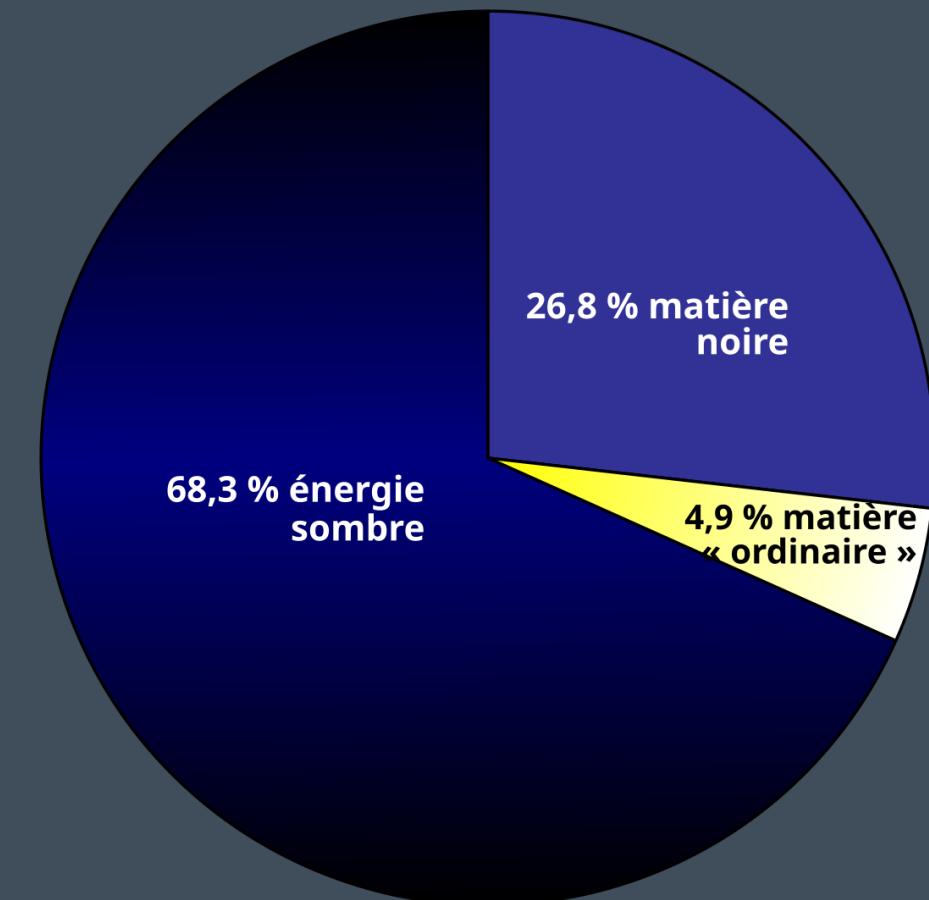
Il y a ~1 siècle

L'univers est constitué d'étoiles, de gaz, de poussières, de planètes, ...

Le tout formant des galaxies, qui elles mêmes forment des amas.

« Matière ordinaire »

Aujourd'hui



Quel est le contenu de notre Univers ?

Il y a ~1 siècle

Aujourd’hui

Nous ne connaissons
que 5% de l’Univers

« Matière ordinaire »

Quel est le contenu de notre Univers ?

Il y a ~1 siècle

Aujourd’hui

**Comment a-t-on découvert ce « contenu manquant » de l’Univers ?
Comment l’étudions-nous ? Que sait-on sur la matière noire ?**

« Matière ordinaire »

Matière noire: état de la recherche

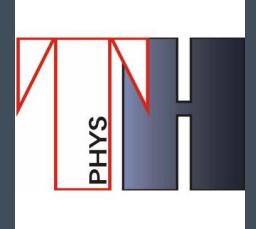
Nicolas Esser

Plan du cours

- 14/01 - Historique et approche observationnelle de la matière noire
- 21/01 - Approche théorique de la matière noire et principaux candidats
- 04/02 - Tests et études modernes de la matière noire: des collisionneurs de particules aux simulations cosmologiques
- 11/02 - Trous noirs primordiaux et matière noire à l'échelle subgalactique

A propos de moi

- Dernière année de doctorat au service de physique théorique
- Spécialisé en trous noirs primordiaux, dynamique stellaire et matière noire aux ‘petites’ échelles
- Bien que théoricien, j’ai un intérêt grandissant pour l’observation
- Site internet: <https://nicolasesser.github.io/>
- **SVP interrompez-moi quand vous avez des questions!**



Leçon 1: Historique et approche observationnelle de la matière noire

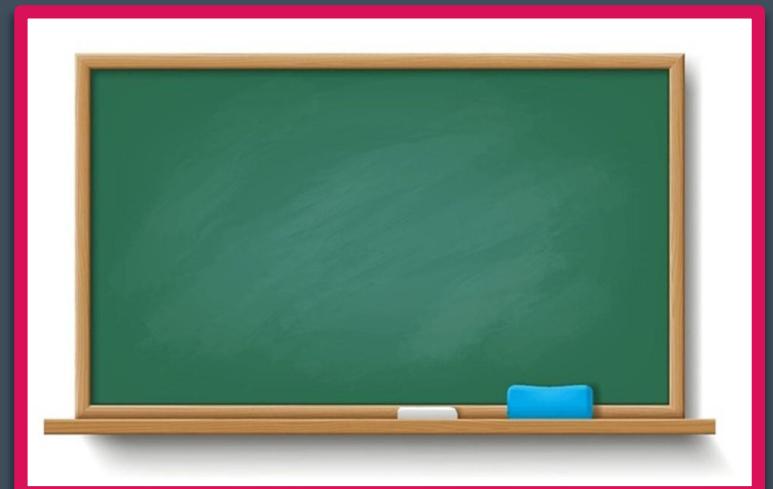
Nicolas Esser

Plan de la leçon

- 1930's - Fritz Zwicky et l'amas de Coma
- 1970's - Vera Rubin et les courbes de rotation des galaxies
- 1990's - COBE et le fond diffus cosmologique
- 2000's - L'amas de la balle de fusil
- Conclusions

Plan de la leçon

- 1930's - Fritz Zwicky et l'amas de Coma
- 1970's - Vera Rubin et les courbes de rotation des galaxies
- 1990's - COBE et le fond diffus cosmologique
- 2000's - L'amas de la balle de fusil
- Conclusions



1933: Zwicky et l'amas de Coma

1933: Zwicky et l'amas de Coma

Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln von F. Zwicky.

(16. II. 33.)

Inhaltsangabe. Diese Arbeit gibt eine Darstellung der wesentlichsten Merkmale extragalaktischer Nebel, sowie der Methoden, welche zur Erforschung derselben gedient haben. Insbesondere wird die sog. Rotverschiebung extragalaktischer Nebel eingehend diskutiert. Verschiedene Theorien, welche zur Erklärung dieses wichtigen Phänomens aufgestellt worden sind, werden kurz besprochen. Schliesslich wird angedeutet, inwiefern die Rotverschiebung für das Studium der durchdringenden Strahlung von Wichtigkeit zu werden verspricht.

1933: Zwicky et l'amas de Coma

Le 'redshift' (decalage vers le rouge) des nébuleuses extragalactiques

Inhaltsangabe. Diese Arbeit gibt eine Darstellung der wesentlichsten Merkmale extragalaktischer Nebel, sowie der Methoden, welche zur Erforschung derselben gedient haben. Insbesondere wird die sog. Rotverschiebung extragalaktischer Nebel eingehend diskutiert. Verschiedene Theorien, welche zur Erklärung dieses wichtigen Phänomens aufgestellt worden sind, werden kurz besprochen. Schliesslich wird angedeutet, inwiefern die Rotverschiebung für das Studium der durchdringenden Strahlung von Wichtigkeit zu werden verspricht.

1933: Zwicky et l'amas de Coma

Le 'redshift' (decalage vers le rouge) des nébuleuses extragalactiques

Inhaltsangabe: Diese Arbeit gibt eine Darstellung der wesentlichsten Merkmale extragalaktischer Nebel, sowie der Methoden, welche zur Erforschung derselben gedient haben. Insbesondere wird die sog. Rotverschiebung extragalaktischer Nebel eingehend diskutiert. Verschiedene Theorien, welche zur Erklärung dieses wichtigen Phänomens aufgestellt worden sind, werden kurz besprochen. Schliesslich wird angedeutet, inwiefern die Rotverschiebung für das Studium der durchdringenden Strahlung von Wichtigkeit zu werden verspricht.

Nom fourre-tout de l'époque

L'amas de Coma



L'amas de Coma

- Amas de la chevelure de Bérénice (Coma cluster)
- Distance: 300 millions d'années-lumière (~100 Mpc)
- Taille : 25 millions d'années-lumière (~ 8 Mpc)
- Contient ~1000 galaxies brillantes, et certainement quelques milliers de galaxies naines



1933: Zwicky et l'amas de Coma

Le 'redshift' (decalage vers le rouge)
des nébuleuses extragalactiques

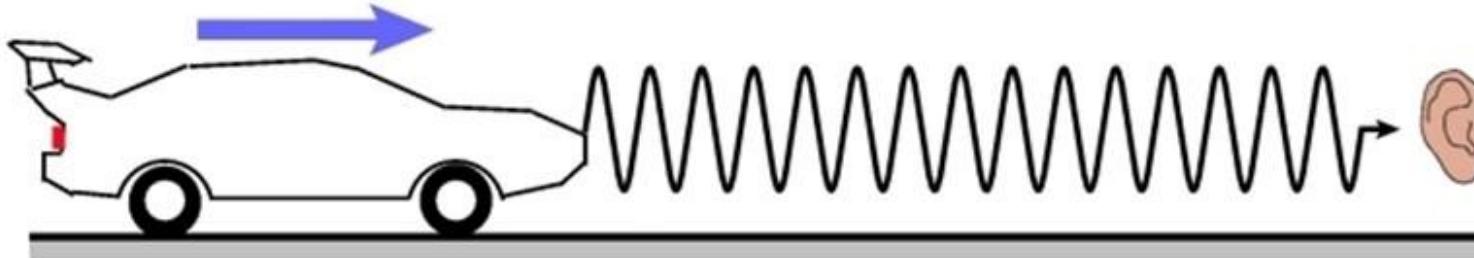
Inhaltsangabe. Diese Arbeit gibt eine Darstellung der wesentlichsten Merkmale extragalaktischer Nebel, sowie der Methoden, welche zur Erforschung derselben gedient haben. Insbesondere wird die sog. Rotverschiebung extragalaktischer Nebel eingehend diskutiert. Verschiedene Theorien, welche zur Erklärung dieses wichtigen Phänomens aufgestellt worden sind, werden kurz besprochen. Schliesslich wird angedeutet, inwiefern die Rotverschiebung für das Studium der durchdringenden Strahlung von Wichtigkeit zu werden verspricht.

????

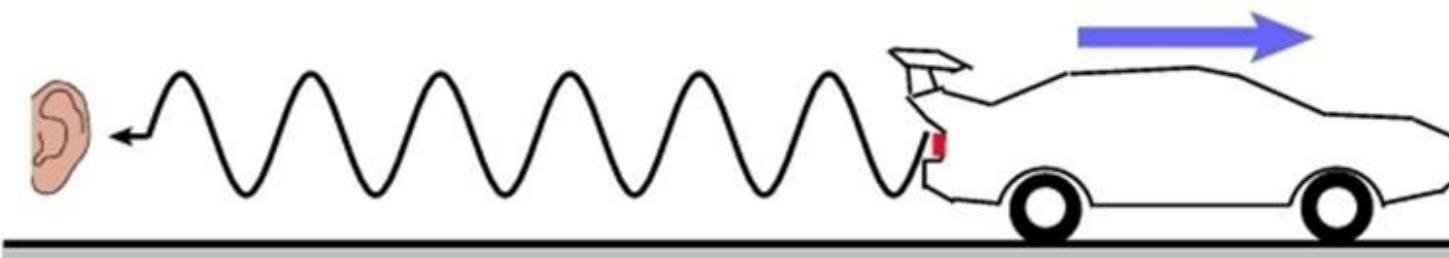
Le redshift

Le redshift = L'effet Doppler

Le redshift = L'effet Doppler

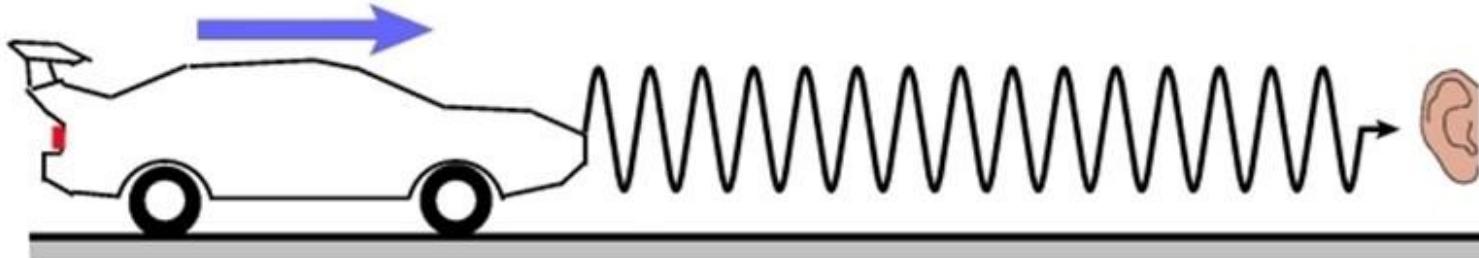


Le véhicule se rapproche : le son est perçu plus aigu



Le véhicule s'éloigne : le son est perçu plus grave

Le redshift = L'effet Doppler



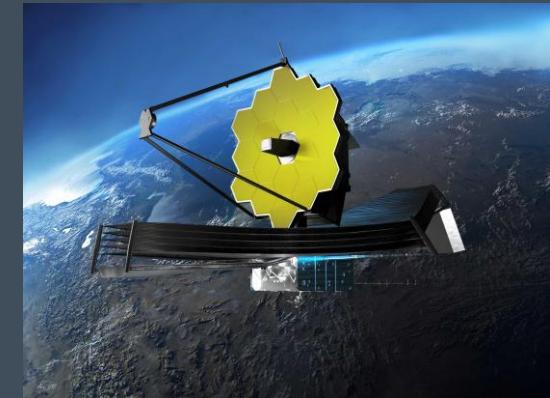
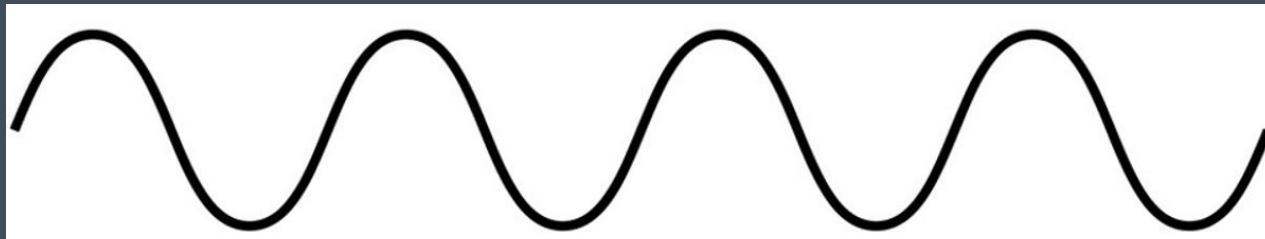
Le véhicule se rapproche : le son est perçu plus aigu



Le véhicule s'éloigne : le son est perçu plus grave

$$\lambda' = \lambda \cdot \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$$

Le redshift dans l'espace



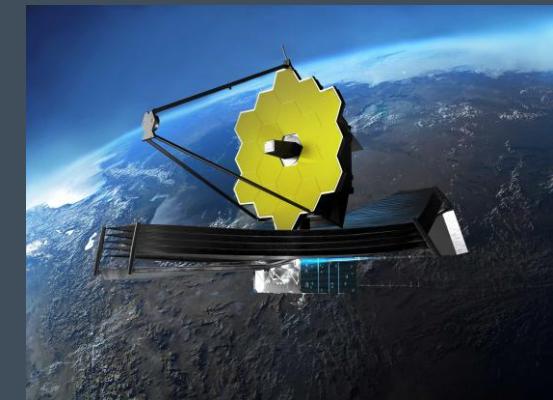
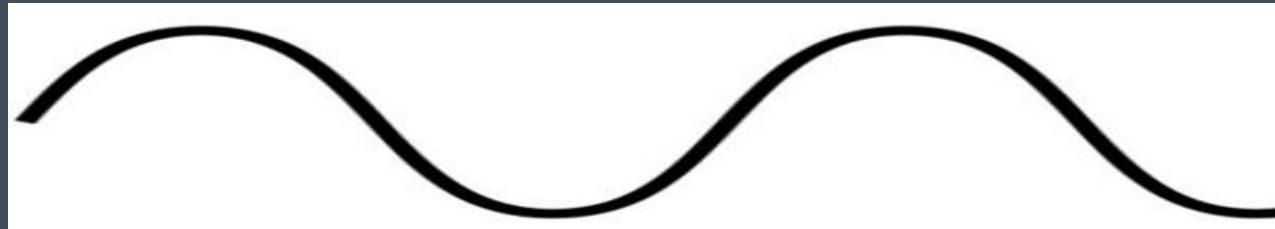
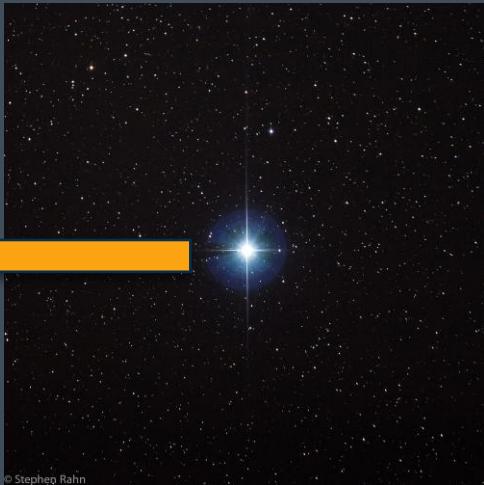
© Stephen Rahn

Le redshift dans l'espace



© Stephen Rahn

Le redshift dans l'espace



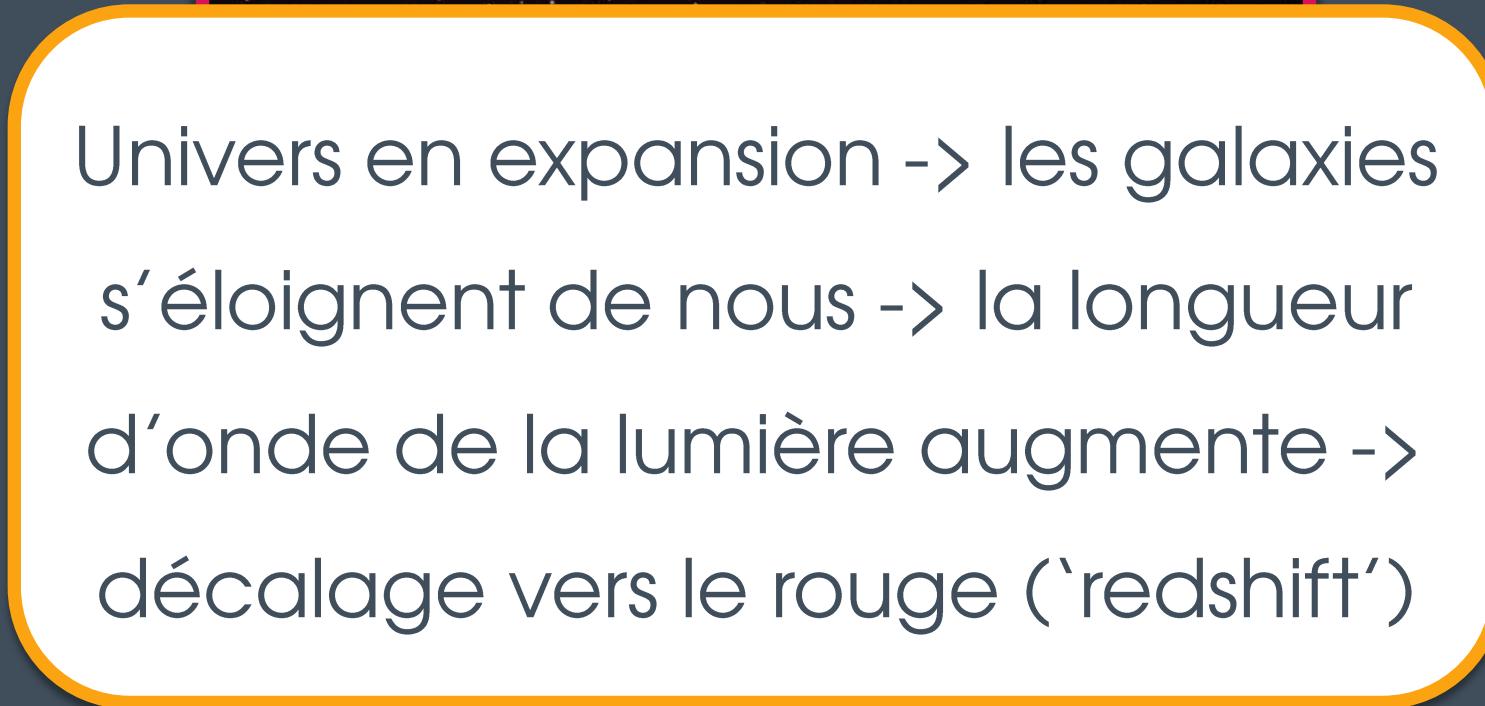
© Stephen Rahn

Le redshift dans l'espace



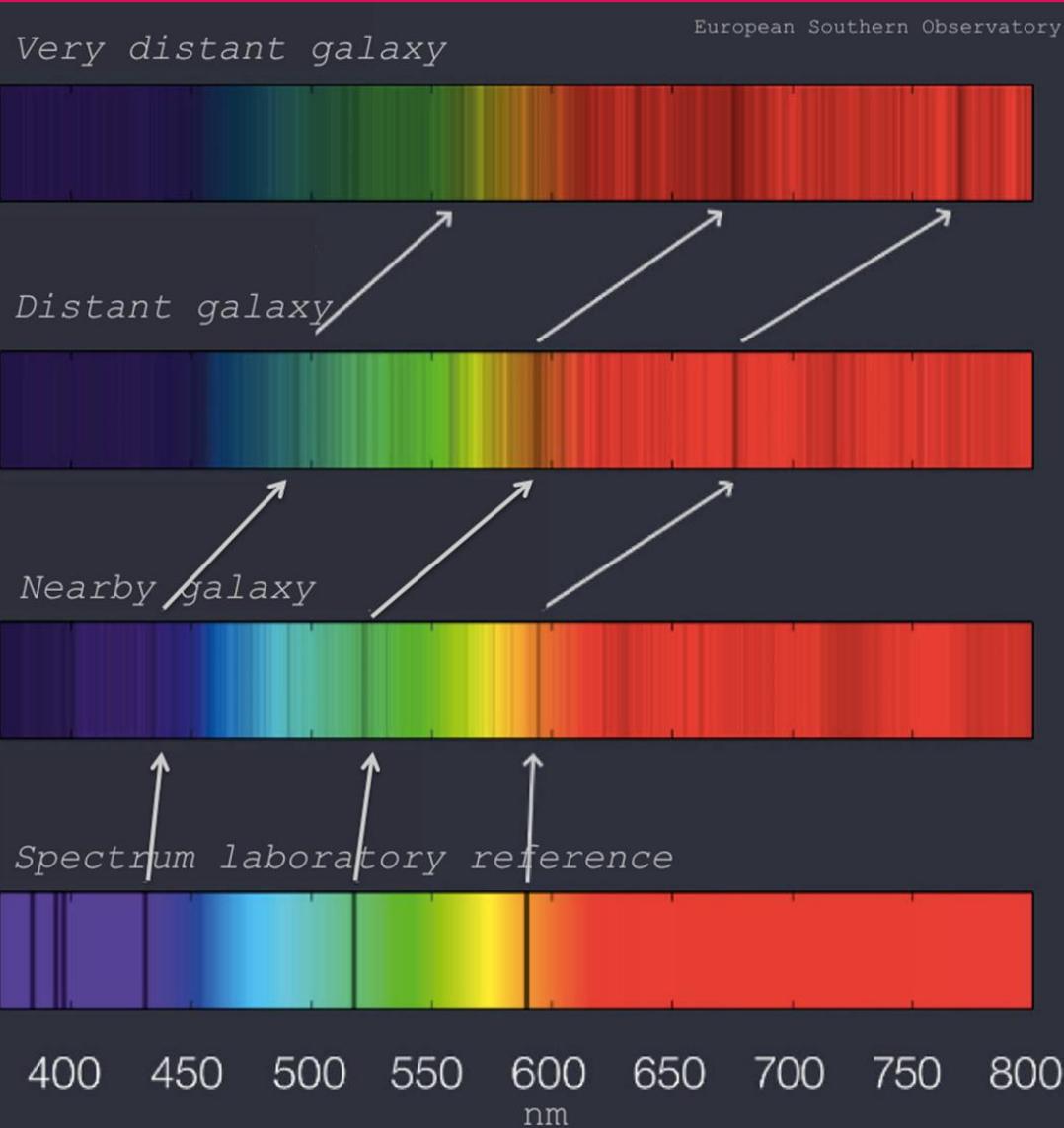
© Stephen Rahn

Le redshift dans l'espace



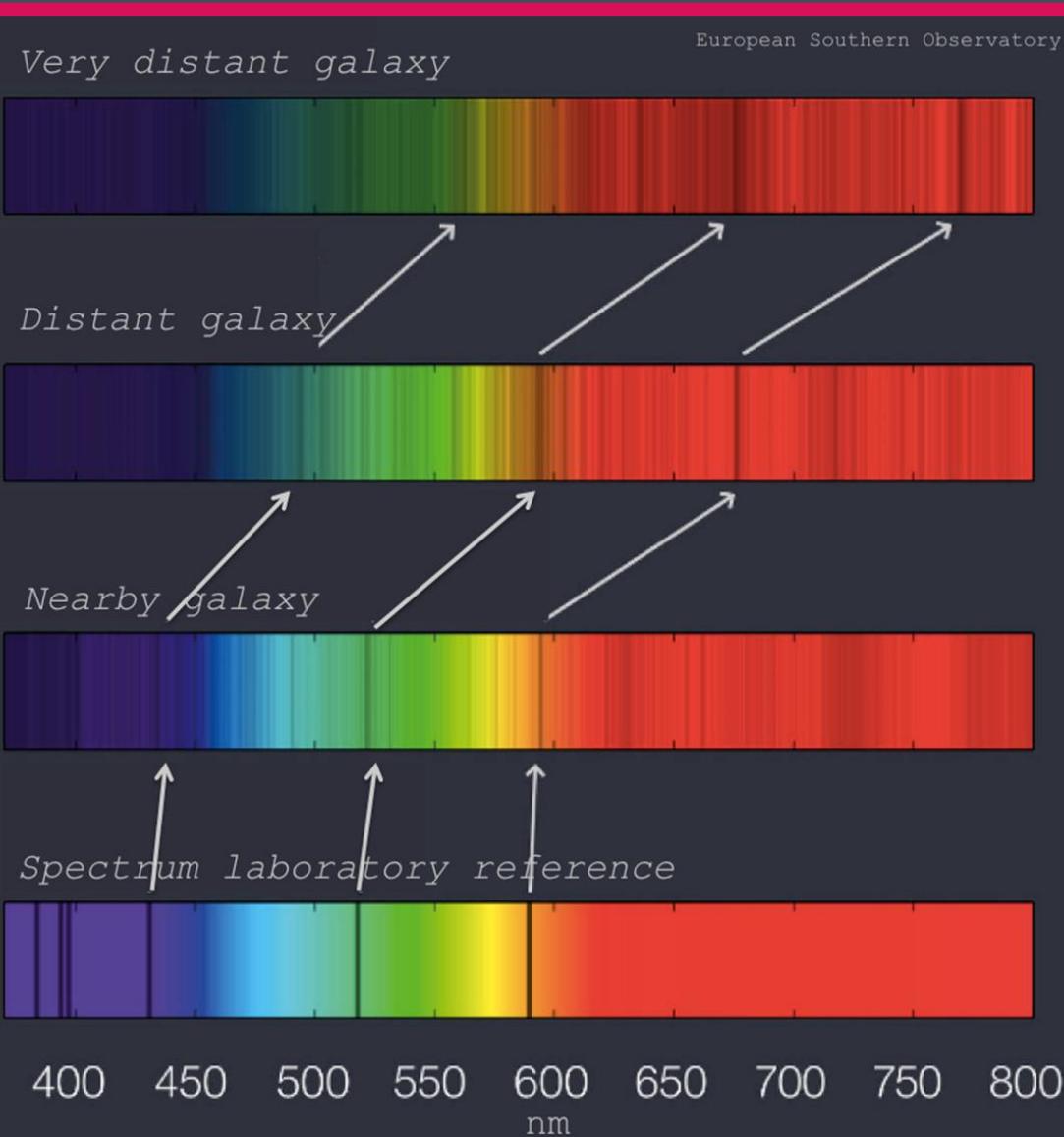
Univers en expansion -> les galaxies s'éloignent de nous -> la longueur d'onde de la lumière augmente -> décalage vers le rouge ('redshift')

Le redshift dans l'espace



$$\lambda' = \lambda \cdot \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$$

Le redshift dans l'espace



$$\lambda' = \lambda \cdot \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$$

Le décalage des raies nous donne la vitesse des galaxies par rapport à nous !

Zwicky et l'amas de Coma



Zwicky et l'amas de Coma



Scheinbare Geschwindigkeiten im Comahaufen.

$v = 8500$	km/sek	6900	km/sek
7900		6700	
7600		6600	
7000		5100	(?)

Zwicky et l'amas de Coma



Scheinbare Geschwindigkeiten im Comahaufen.

$v = 8500$	km/sek	6900	km/sek
7900		6700	
7600		6600	
7000		5100 (?)	

L'amas de Coma s'éloigne
de nous avec une vitesse
moyenne de 7500 km/s
(~27 millions de km/h)

Zwicky et l'amas de Coma

Les galaxies de l'amas
ont des vitesses relatives
de ~ 1000 km/s !

Zwicky et l'amas de Coma

Comparons avec une
prédition théorique !

La force de gravitation

Loi de Newton: $\vec{F} = m\vec{a}$

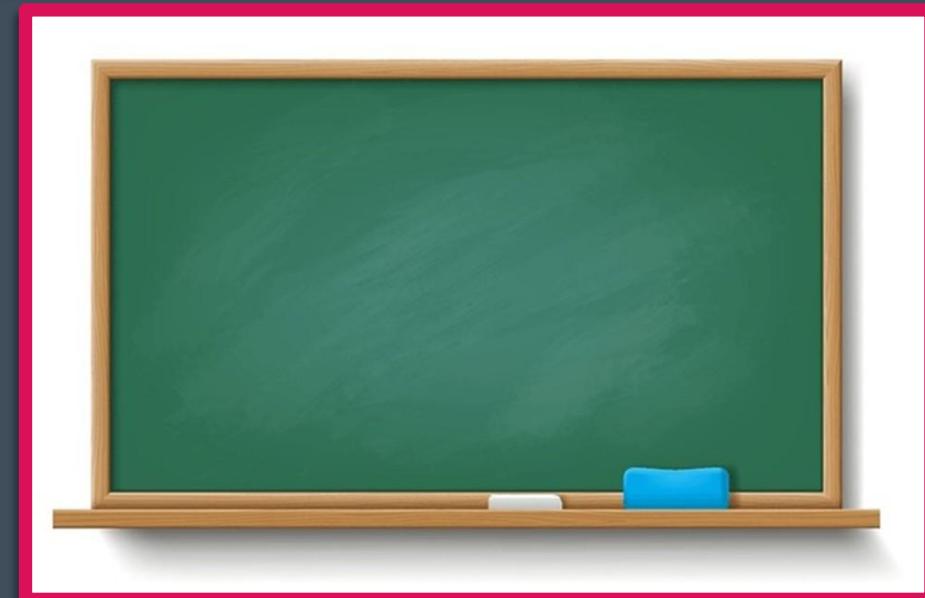
Force de gravitation: $\vec{F} = -\frac{GMm}{r^3}\vec{r}$

La force de gravitation

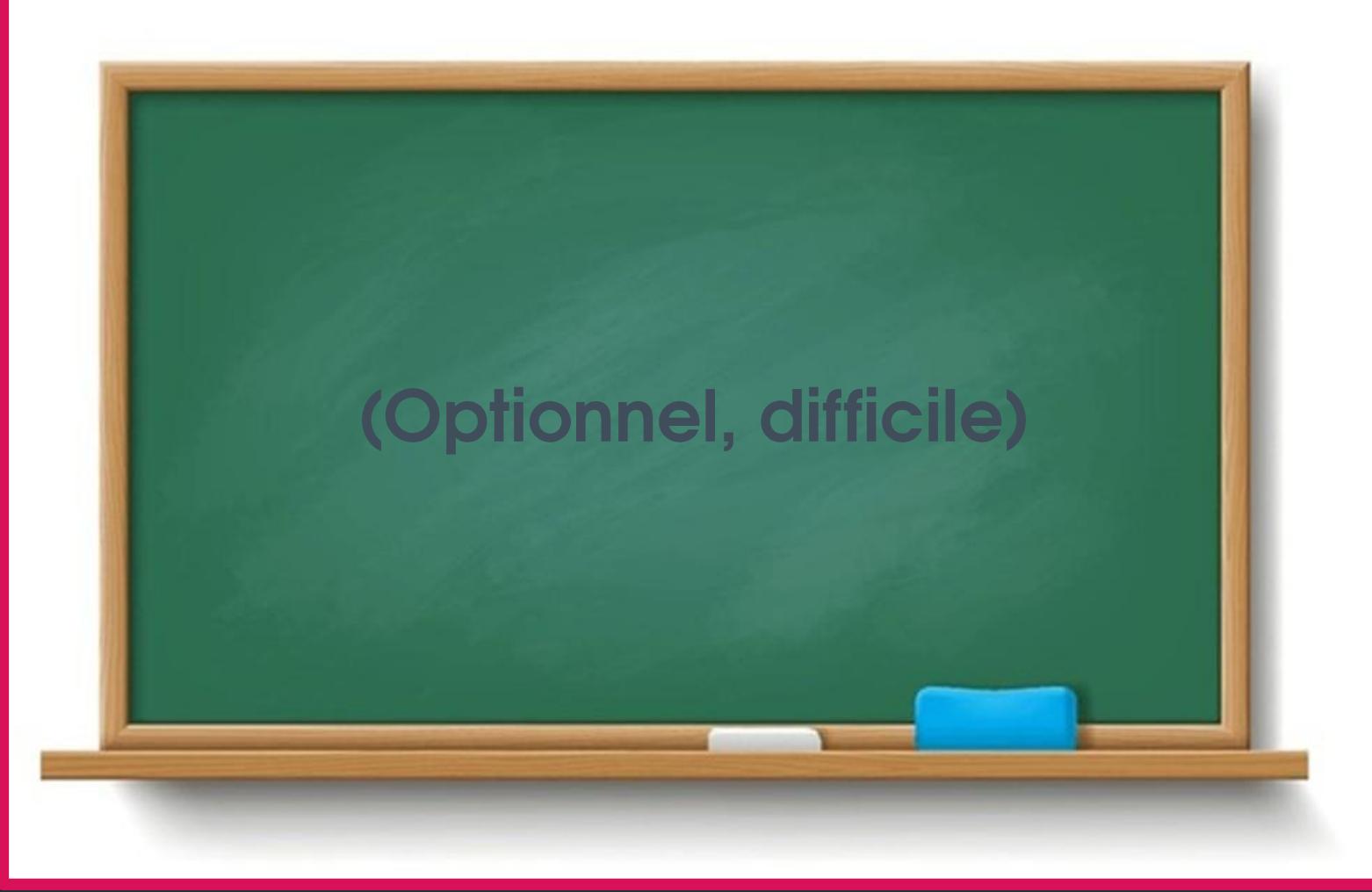
Loi de Newton: $\vec{F} = m\vec{a}$

Force de gravitation: $\vec{F} = -\frac{GMm}{r^3}\vec{r}$

Exemple: accélération
de la Terre sur moi



Le théorème du Viriel



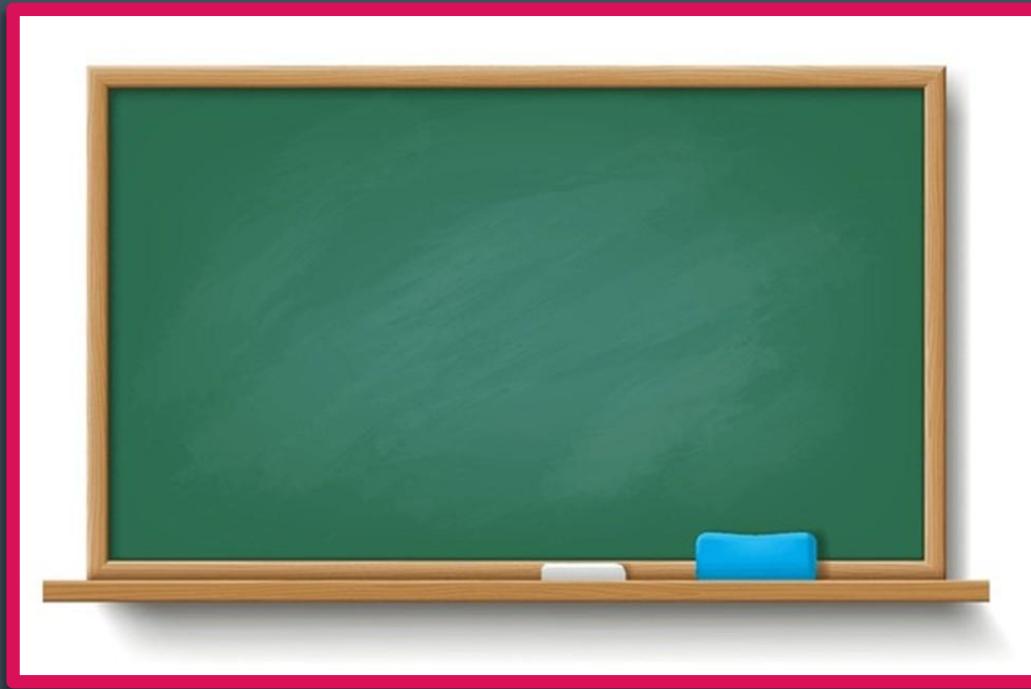
(Optionnel, difficile)

Le théorème du Viriel

$$\langle E_c \rangle = -\frac{1}{2} \langle U \rangle$$

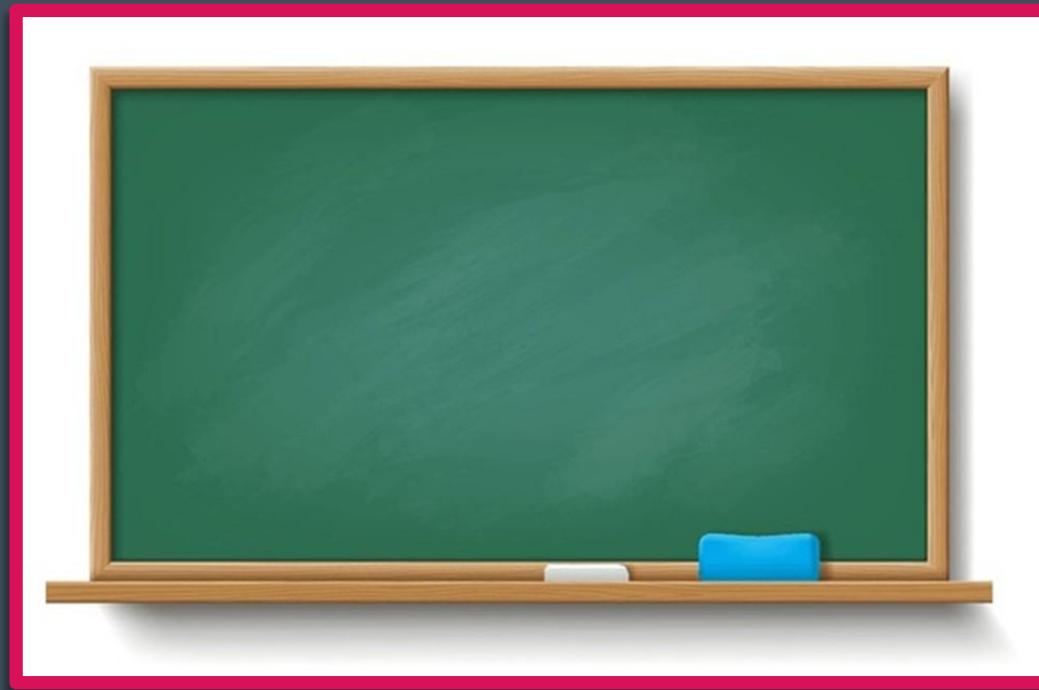
L'énergie cinétique moyenne d'un système gravitationnel à l'équilibre est égale à l'opposé de la moitié de son énergie potentielle

Le théorème du Viriel



Implication pour un amas de galaxies:

Le théorème du Viriel



Implication pour un amas de galaxies: $v \sim \sqrt{GM/R}$

Zwicky et l'amas de Coma

$$v \sim \sqrt{GM/R}$$



Zwicky et l'amas de Coma

$$v \sim \sqrt{GM/R}$$



Zwicky:

- Masse totale proportionnelle à la lumière totale: $M = 800 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{30} = 1.6 \cdot 10^{45} \text{ kg}$
- Rayon de l'amas = 1 million d'années-lumière
= 10^{22} mètres
- On trouve: $v \sim 100 \text{ km/s}$

Zwicky et l'amas de Coma



Scheinbare Geschwindigkeiten im Comahaufen.

$v = 8500$	km/sek	6900	km/sek
7900		6700	
7600		6600	
7000		5100 (?)	

$v_{\text{obs}} \sim 1000$ km/s

Zwicky et l'amas de Coma

$$v_{\text{theo}} \sim \sqrt{GM/R} \sim 100 \text{ km/s}$$

VS

$$v_{\text{obs}} \sim 1000 \text{ km/s}$$

Zwicky et l'amas de Coma

v_{th}

Il faut plus de masse
que celle qu'on voit !

$v_{\text{obs}} \sim 1000 \text{ km/s}$

Zwicky et l'amas de Coma

dunkle Materie

LA MATIERE NOIRE

Les courbes de rotation des galaxies

Les courbes de rotation des galaxies

ROTATIONAL PROPERTIES OF 21 Sc GALAXIES WITH A LARGE RANGE OF
LUMINOSITIES AND RADII, FROM NGC 4605 ($R = 4$ kpc) TO
UGC 2885 ($R = 122$ kpc)

VERA C. RUBIN,^{1,2} W. KENT FORD, JR.,¹ AND NORBERT THONNARD

Department of Terrestrial Magnetism, Carnegie Institution of Washington

Received 1979 October 11; accepted 1979 November 29

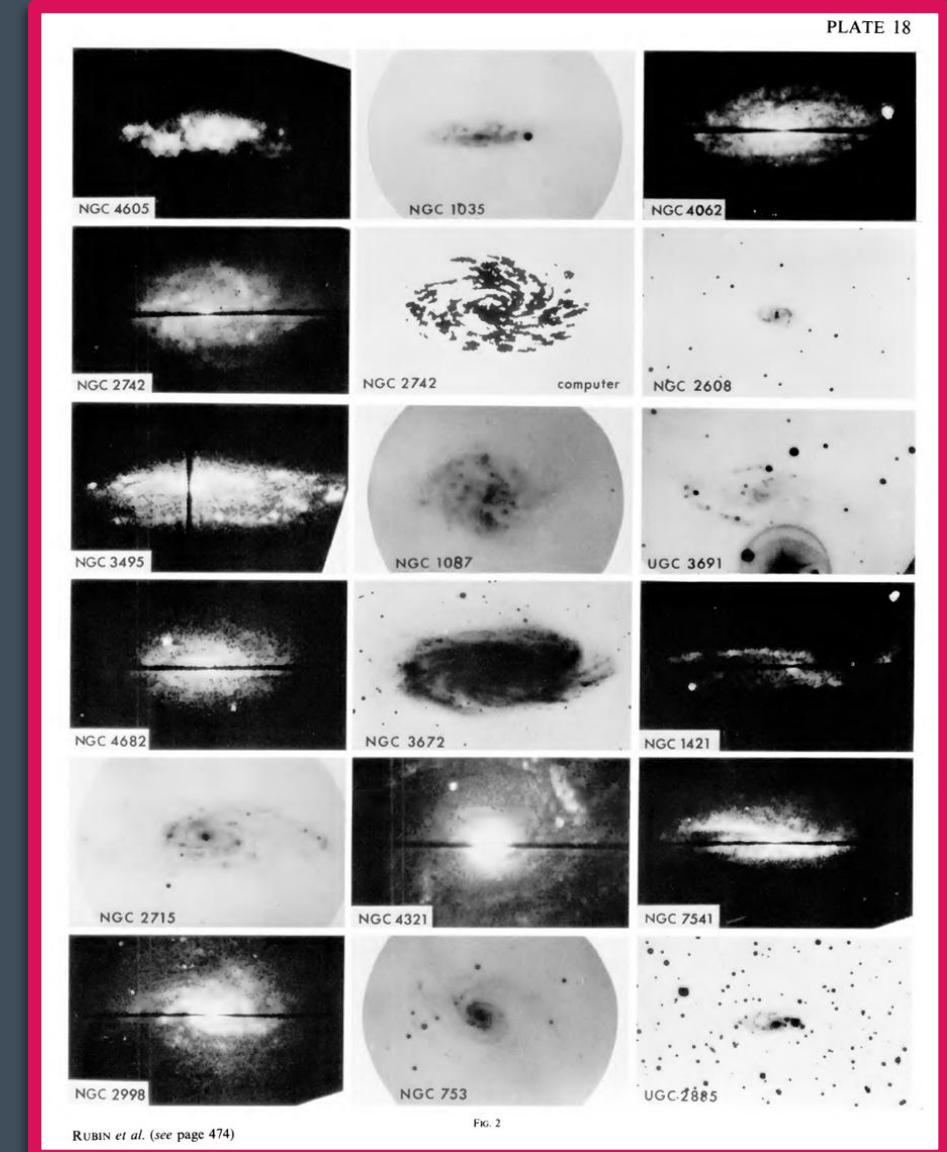
(et d'autres papiers)

Vera Rubin s'intéresse au
mouvement des étoiles et du gaz à
l'intérieur des galaxies.

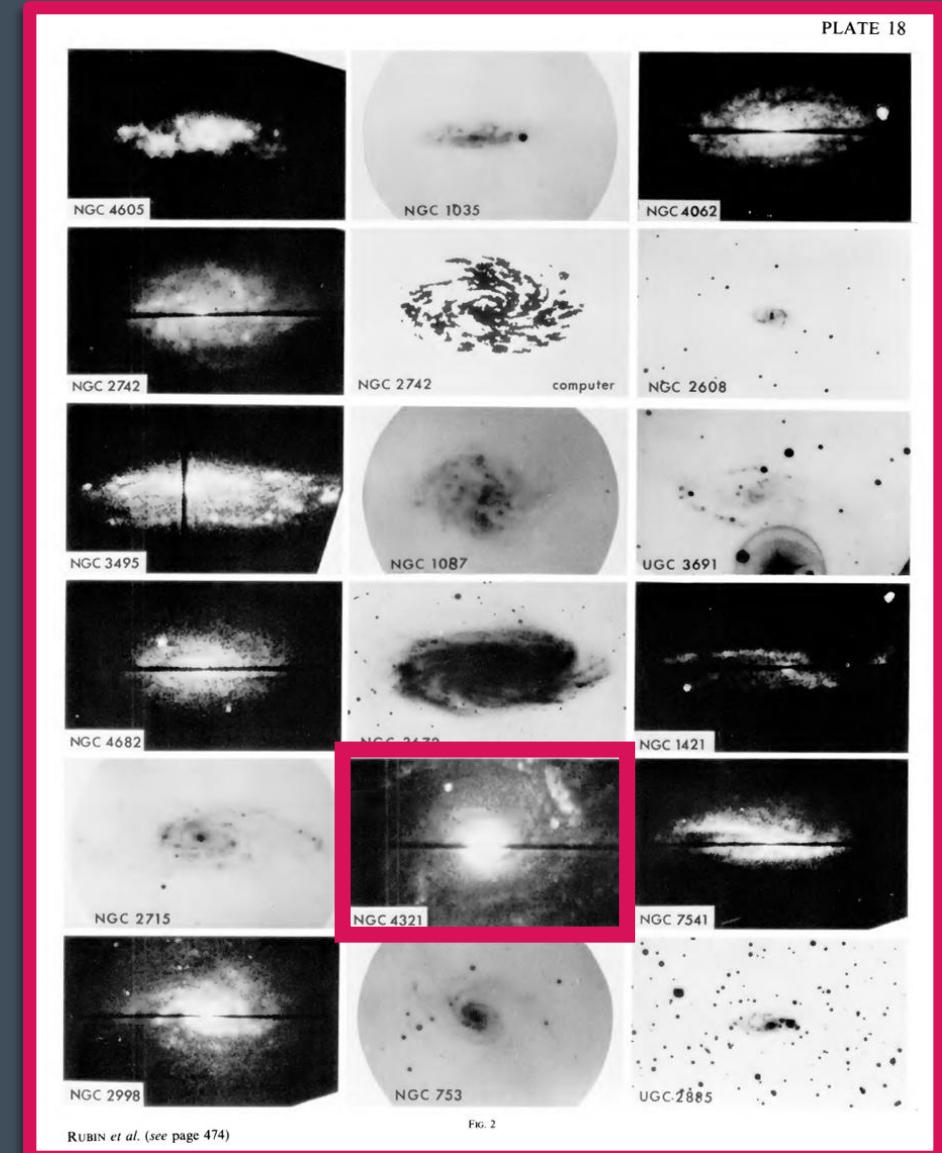
Les courbes de rotation des galaxies



Les courbes de rotation des galaxies



NGC4321



NGC4321



- NGC4321 (M100), 'Mirror galaxy'
- Distance: 5 millions d'années-lumière
- Taille: ~150 000 années-lumière
- Rubin utilise des observations spectroscopiques de son gaz chaud, qui émet de la lumière.

Les courbes de rotation des galaxies

TABLE 1
PARAMETERS FOR PROGRAM Sc GALAXIES

NGC	Class RSA	V_o km/s	V_c km/s	Distance Mpc	Observed Position Angles (6)	ϕ (°)	i (°)	Radius (')	R_{25} kpc (10)	Δm_b mag (11)	$R^{i,b}$ kpc (12)	R_{farthest} kpc (13)	$\frac{R_f}{R^{i,b}}$ (14)	V_{\max} km/s (15)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)		(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
4605	Sc(s)III	150±25	288*	5.8	122, 110	110:D	68	2.75	4.60	0	4.29	3.3	0.77	101
1035	Sc:III	1230±10	1227*	24.5	138, 60	142D	71	1.12	8.00	0.02	7.46	7.0	0.94	128
4062	Sc(s)II-III	747±10	742*	14.8	104	104	64	2.14	9.22	0	8.80	9.0	1.02	163
2742	Sc(r)II	1267±10	1363*	27.3	88, 178	88D	58	1.55	12.3	0.18	12.5	10.6	0.85	171
701	Sc(s)II.2:	1795±10	1825*	36.5	43	43	61	1.26	13.4	0.02	12.7	7.7	0.61	151
2608	ScII:	2125±15	2059*	41.2	62	62	50	1.26	15.0	0.10	15.1	11.7	0.78	132
3495	Sc(s)III	1114±15	952*	19.0	20, 110	25D	78	2.29	12.6	0.79	15.2	12.7	0.84	179
1087	Sc(s)III.3	1503±10	1523*	30.5	1	1	50	1.74	15.3	0.10	15.4	11.0	0.71	140
U3691	(Sc)	2182±15	2076*	41.5	65	65	65	1.2	14.5	0.62	16.6	14.0	0.84	134
4682	Sc(s)II.4	2307±10	2152*	43.0	87	87	57	1.41	17.7	0.09	17.3	14.8	0.86	178
3672	Sc(s)I-II	1857±10	1655	33.1	8, 98	8D	70	2.03	19.5	0.06	18.7	17.8	0.95	192
1421	ScIII:	2063±15	1985*	39.7	1	1	78	1.82	21.0	0.09	19.5	20.0	1.03	208
2715	Sc(s)II	1308±10	1487*	29.7	20	20	70	2.51	21.7	0.01	20.2	18.4	0.91	160
4321	Sc(s)I	1545±25	1478*	20	110, 140, 35	155:D	35	3.46	20.1	0.03	20.1	14.6	0.73	210
IC467	(Sc)	2025±15	2213*	44.3	72	72	67	1.70	21.9	0.13	21.4	20.9	0.98	152
7541	ScIII:	2685±10	2873	57.5	79, 102	102	72	1.74	29.0	0.20	28.4	23.0	0.81	247
7664	(Sc)	3464±15	3709	74.2	90, 6	94D	58	1.65	35.6	0.16	34.9	28.0	0.80	203
2998	Sc(rs)I	4767±15	4781	95.6	53, 143	52D	62	1.51	42.0	0	40.0	34.0	0.85	215
753	Sc(rs)I	4895±25	5077*	101.5	125	125	50	1.44	42.4	0.21	44.6	24.7	0.55	221
801	(Sc)	5763±15	5948	119.	150, 49	150D	86	1.65	57.1	0.19	53.5	47.4	0.89	232
U2885	(Sc)	5785±25	5887*	118.	140, 40, 43	50D	65	2.75	94.2	1.04	122.	82.3	0.67	280

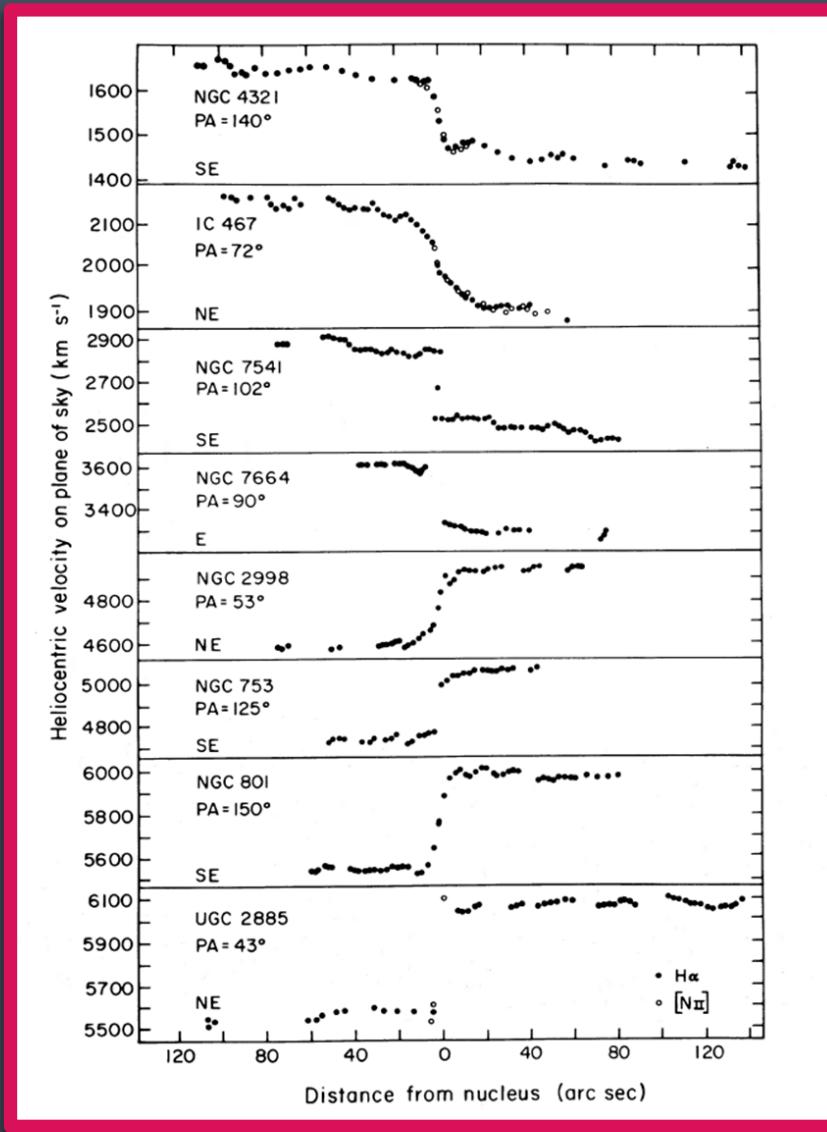
Les courbes de rotation des galaxies

TABLE 1
PARAMETERS FOR PROGRAM Sc GALAXIES

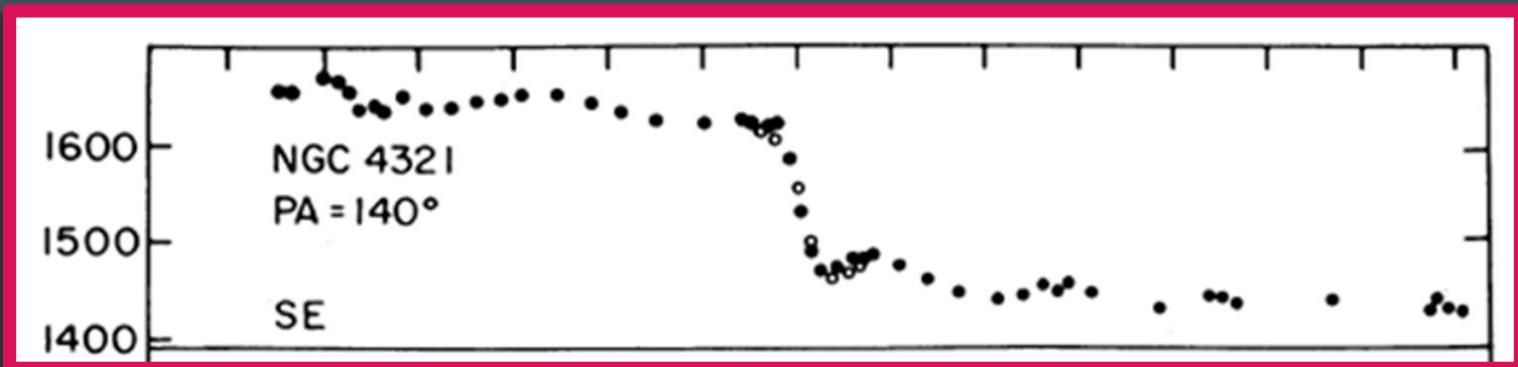
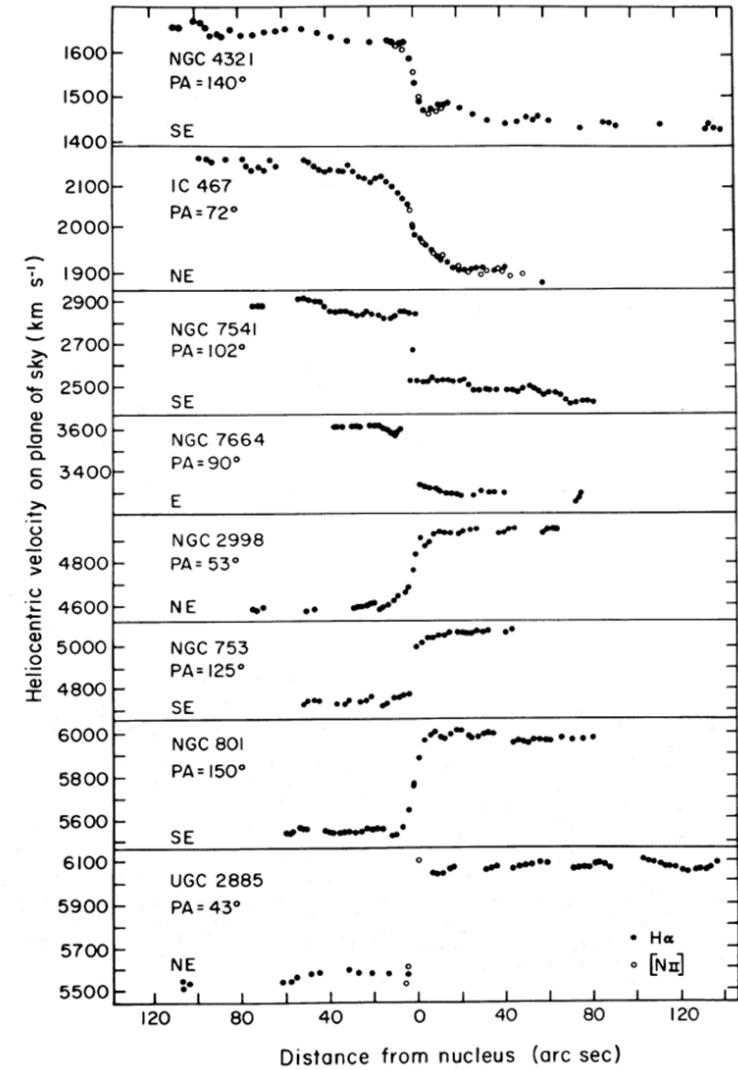
NGC	Class RSA	V_o km/s	V_c km/s	Distance Mpc	Observed Position Angles (6)	ϕ (°)	i (°)	Radius (')	R_{25} kpc (10)	Δm_b mag (11)	$R^{i,b}$ kpc (12)	R_{farthest} kpc (13)	$\frac{R_f}{R^{i,b}}$ (14)	V_{\max} km/s (15)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
4605	Sc(s)III	150±25	288*	5.8	122, 110	110:D	68	2.75	4.60	0	4.29	3.3	0.77	101
1035	Sc:III	1230±10	1227*	24.5	138, 60	142D	71	1.12	8.00	0.02	7.46	7.0	0.94	128
4062	Sc(s)II-III	747±10	742*	14.8	104	104	64	2.14	9.22	0	8.80	9.0	1.02	163
2742	Sc(r)II	1267±10	1363*	27.3	88, 178	88D	58	1.55	12.3	0.18	12.5	10.6	0.85	171
701	Sc(s)II.2:	1795±10	1825*	36.5	43	43	61	1.26	13.4	0.02	12.7	7.7	0.61	151
2608	ScII:	2125±15	2059*	41.2	62	62	50	1.26	15.0	0.10	15.1	11.7	0.78	132
3495	Sc(s)III	1114±15	952*	19.0	20, 110	25D	78	2.29	12.6	0.79	15.2	12.7	0.84	179
1087	Sc(s)III.3	1503±10	1523*	30.5	1	1	50	1.74	15.3	0.10	15.4	11.0	0.71	140
U3691	(Sc)	2182±15	2076*	41.5	65	65	65	1.2	14.5	0.62	16.6	14.0	0.84	134
4682	Sc(s)II.4	2307±10												178
3672	Sc(s)I-II	1857±10												192
1421	ScIII:	2063±15												208
2715	Sc(s)II	1308±10												160
4321	Sc(s)I	1545±25												210
IC467	(Sc)	2025±15												152
7541	ScIII:	2685±10												247
7664	(Sc)	3464±15												203
2998	Sc(rs)I	4767±15												215
753	Sc(rs)I	4895±25	5077*	101.5	125	125	50	1.44	42.4	0.21	44.6	24.7	0.55	221
801	(Sc)	5763±15	5948	119.	150, 49	150D	86	1.65	57.1	0.19	53.5	47.4	0.89	232
U2885	(Sc)	5785±25	5887*	118.	140, 40, 43	50D	65	2.75	94.2	1.04	122.	82.3	0.67	280

NGC4321: $v \sim 1545$ km/s

Les courbes de rotation des galaxies

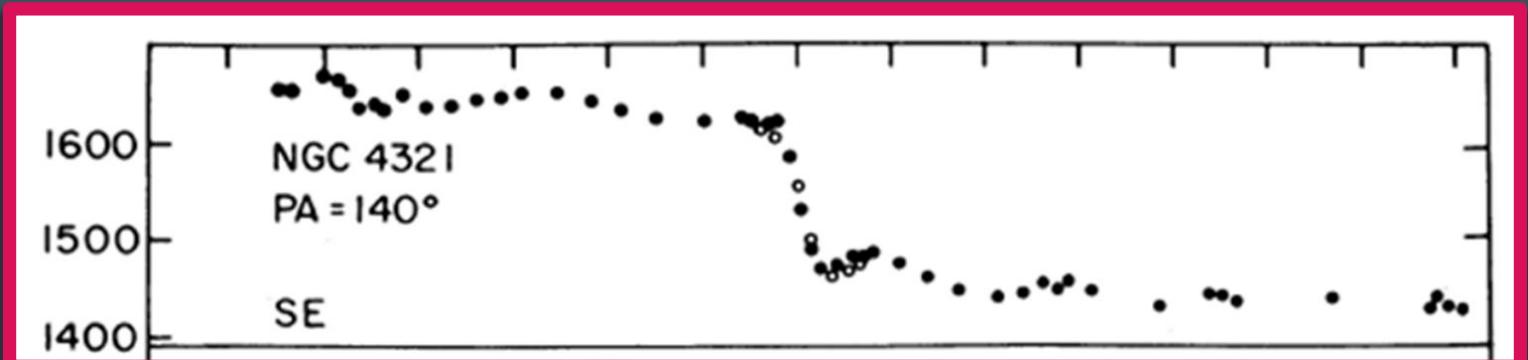


Les courbes de rotation des galaxies



Les courbes de rotation des galaxies

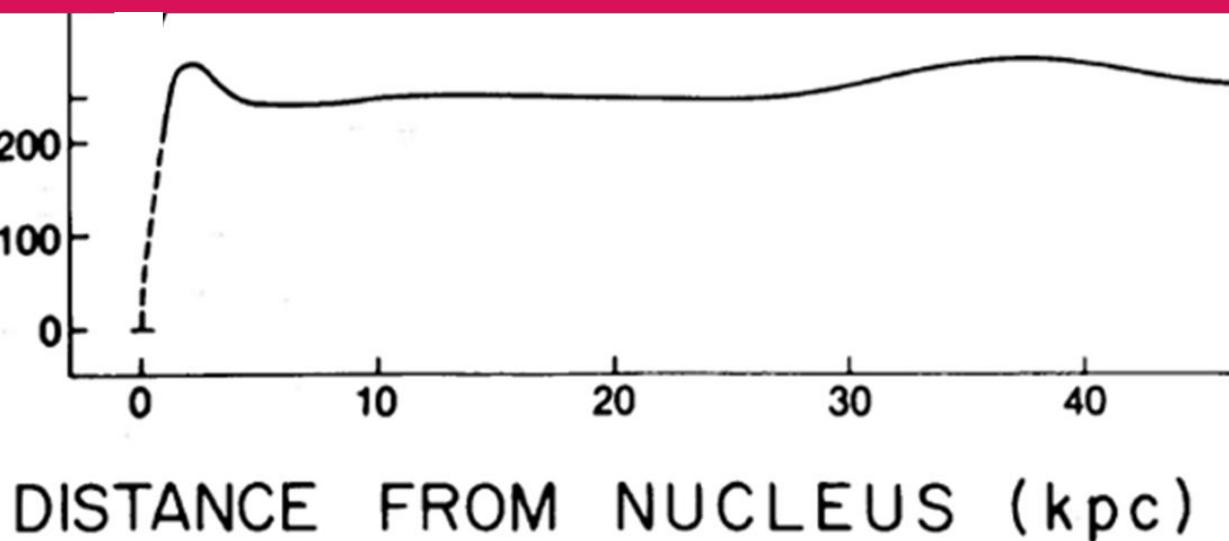
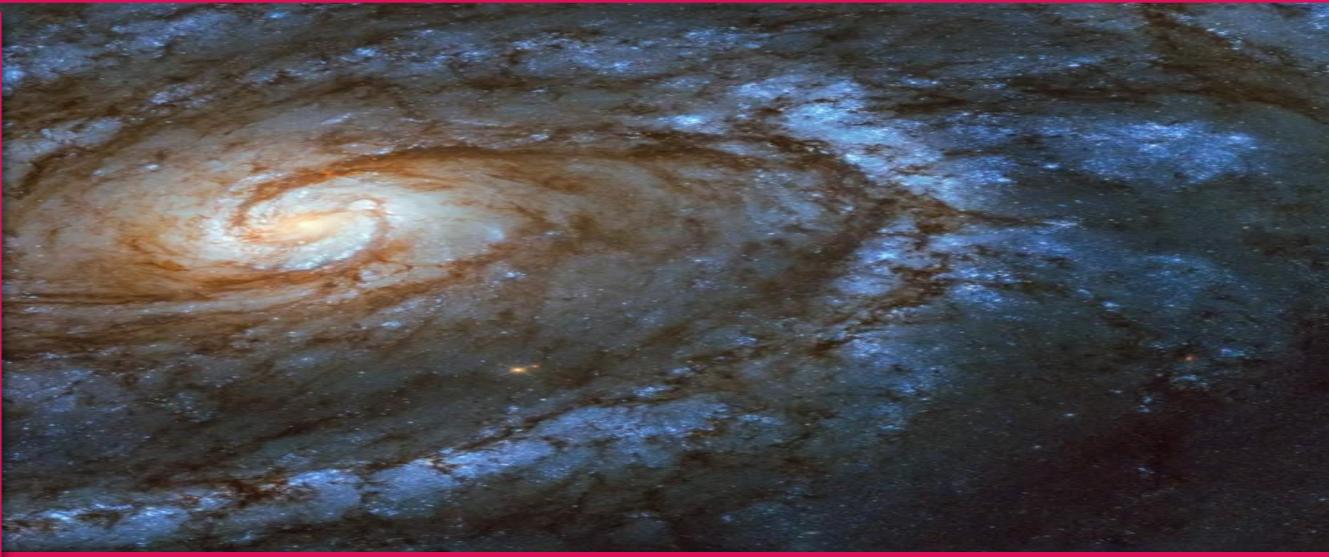
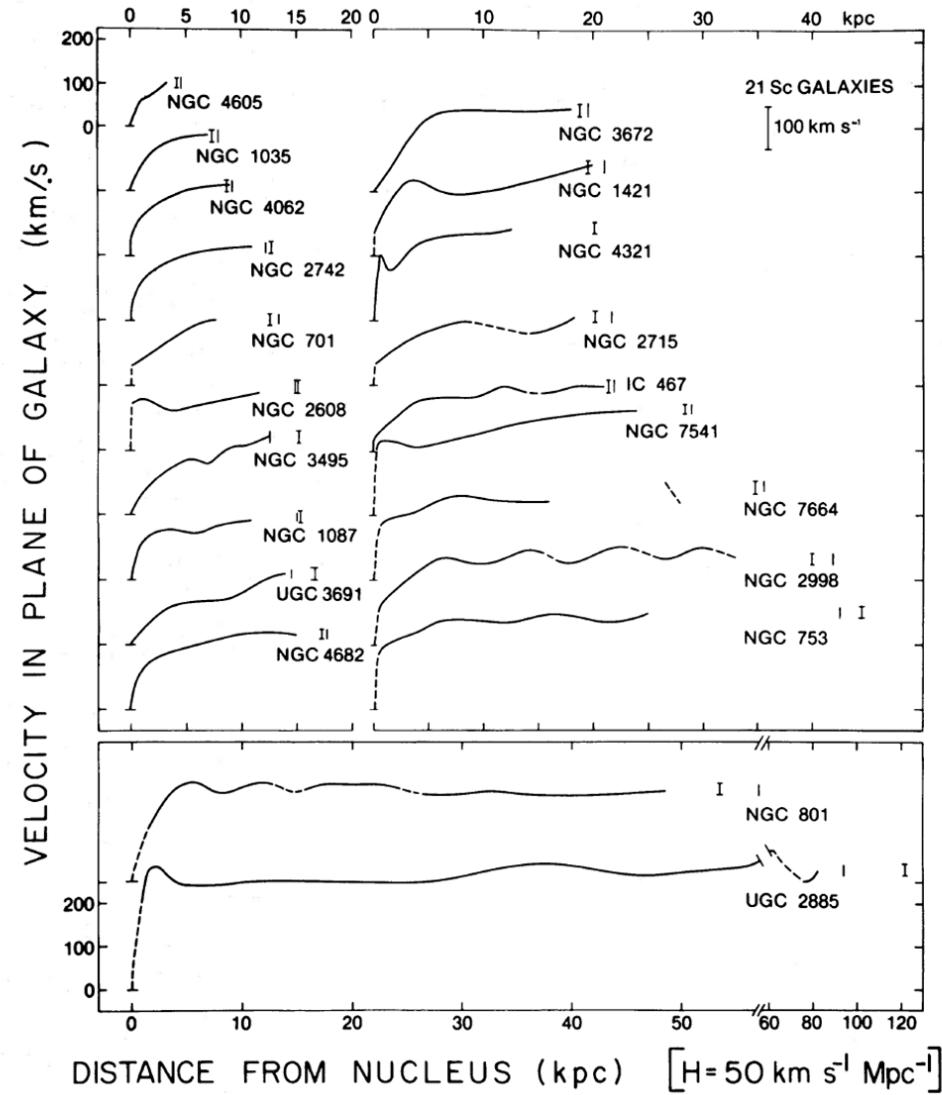
On soustrait: $v \sim 1545$ km/s



Les courbes de rotation des galaxies

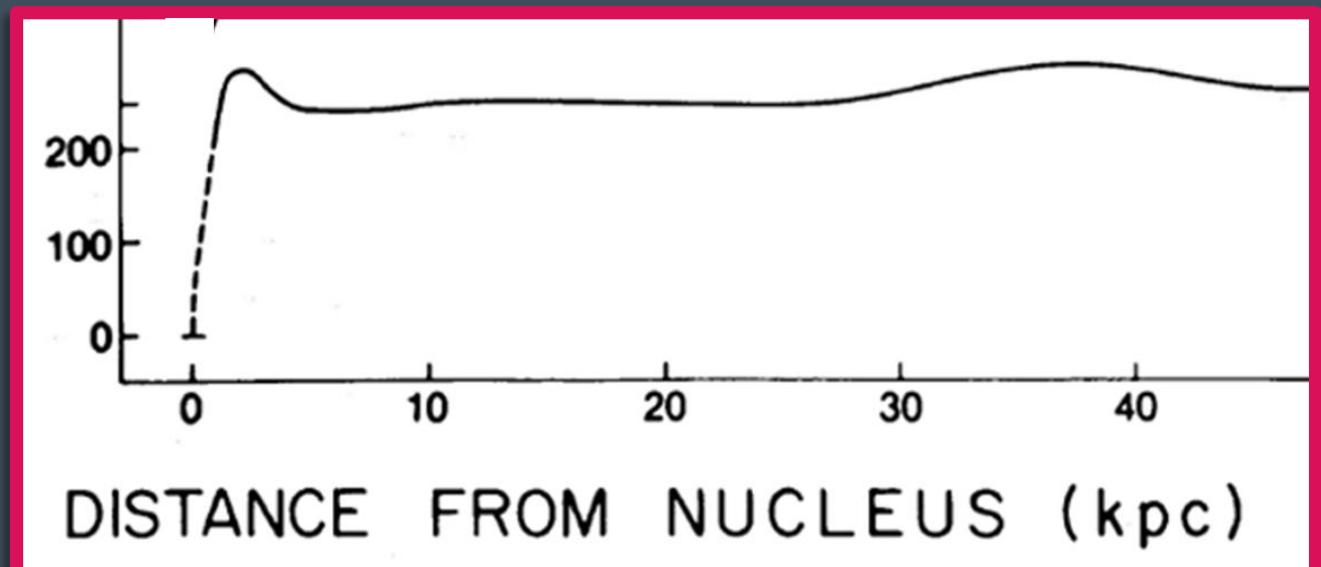
TABLE 2
VELOCITIES IN PLANE OF GALAXY (km s⁻¹)

Les courbes de rotation des galaxies



Les courbes de rotation des galaxies

La courbe de rotation est plate !

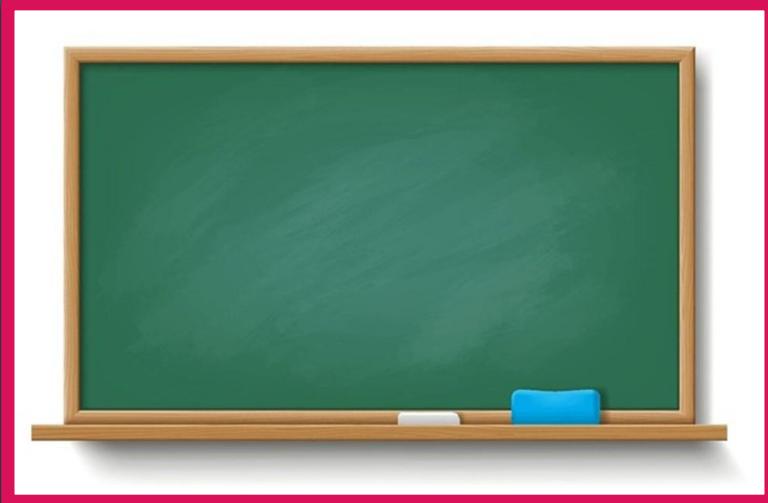


Les courbes de rotation des galaxies

Comparons avec une
prédition théorique!

Les courbes de rotation des galaxies

Comparons avec une
prédition théorique!



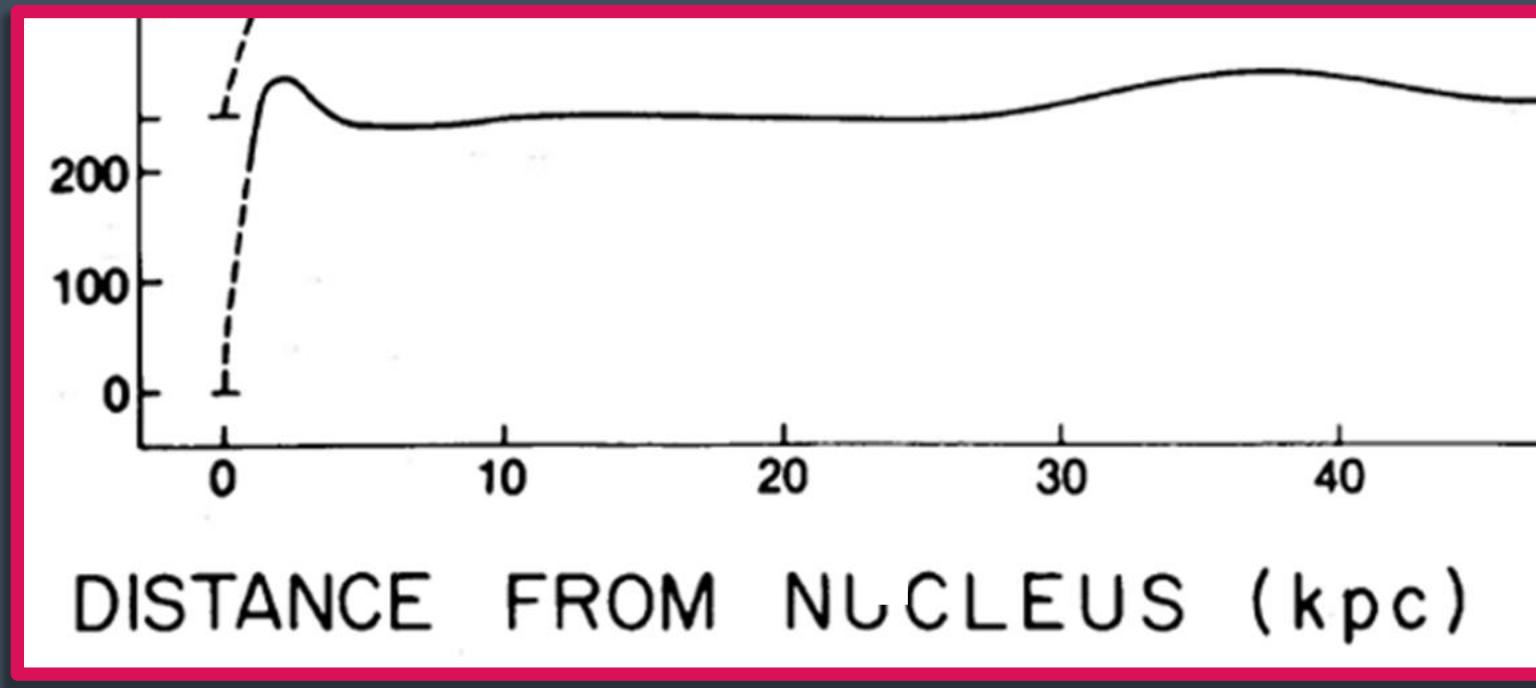
Force de gravitation
 $+ F_c = mv^2/r$

Les courbes de rotation des galaxies

Comparons avec une
prédition théorique!

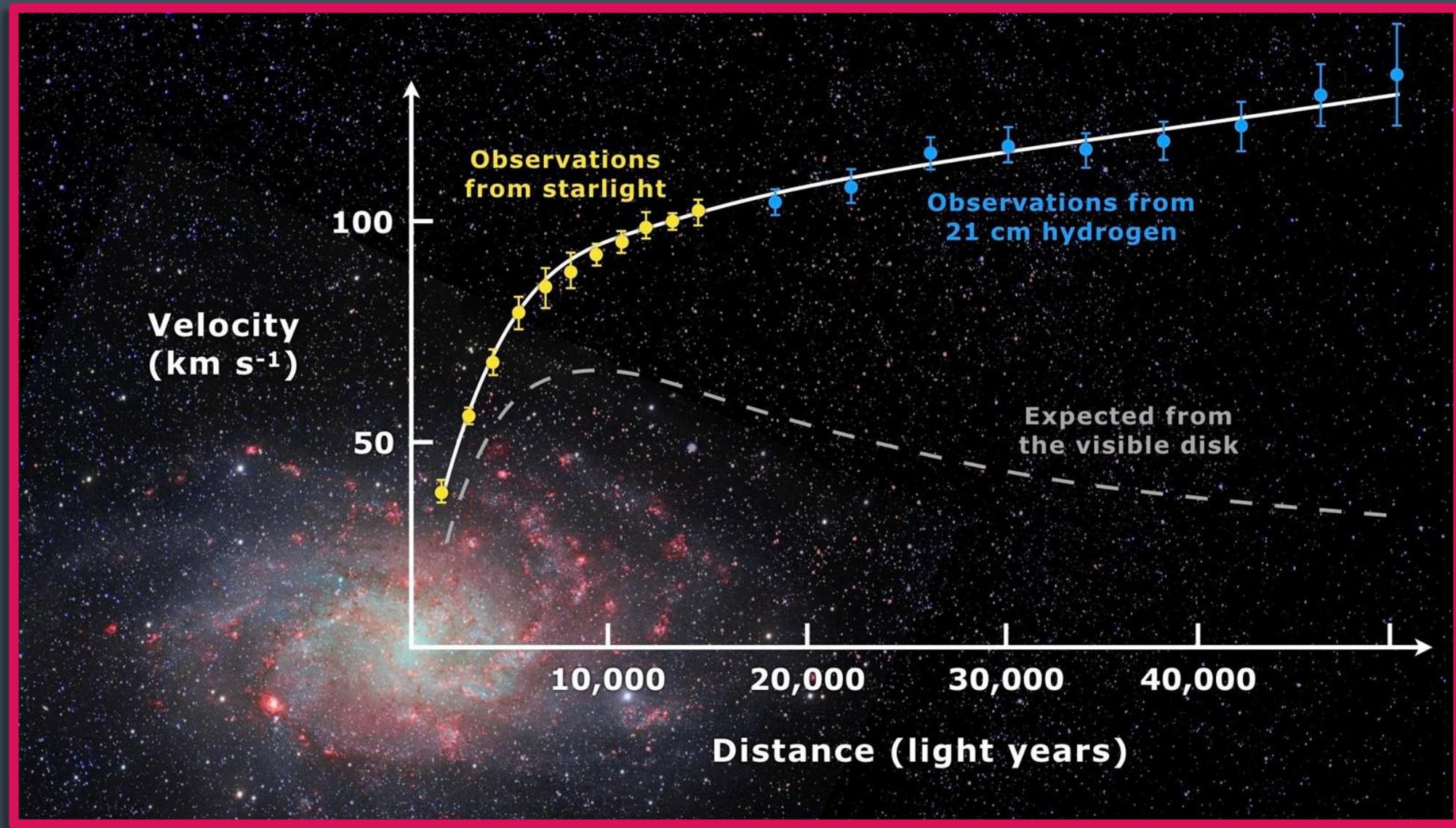
La courbe devrait décroître à
large distance !

Les courbes de rotation des galaxies

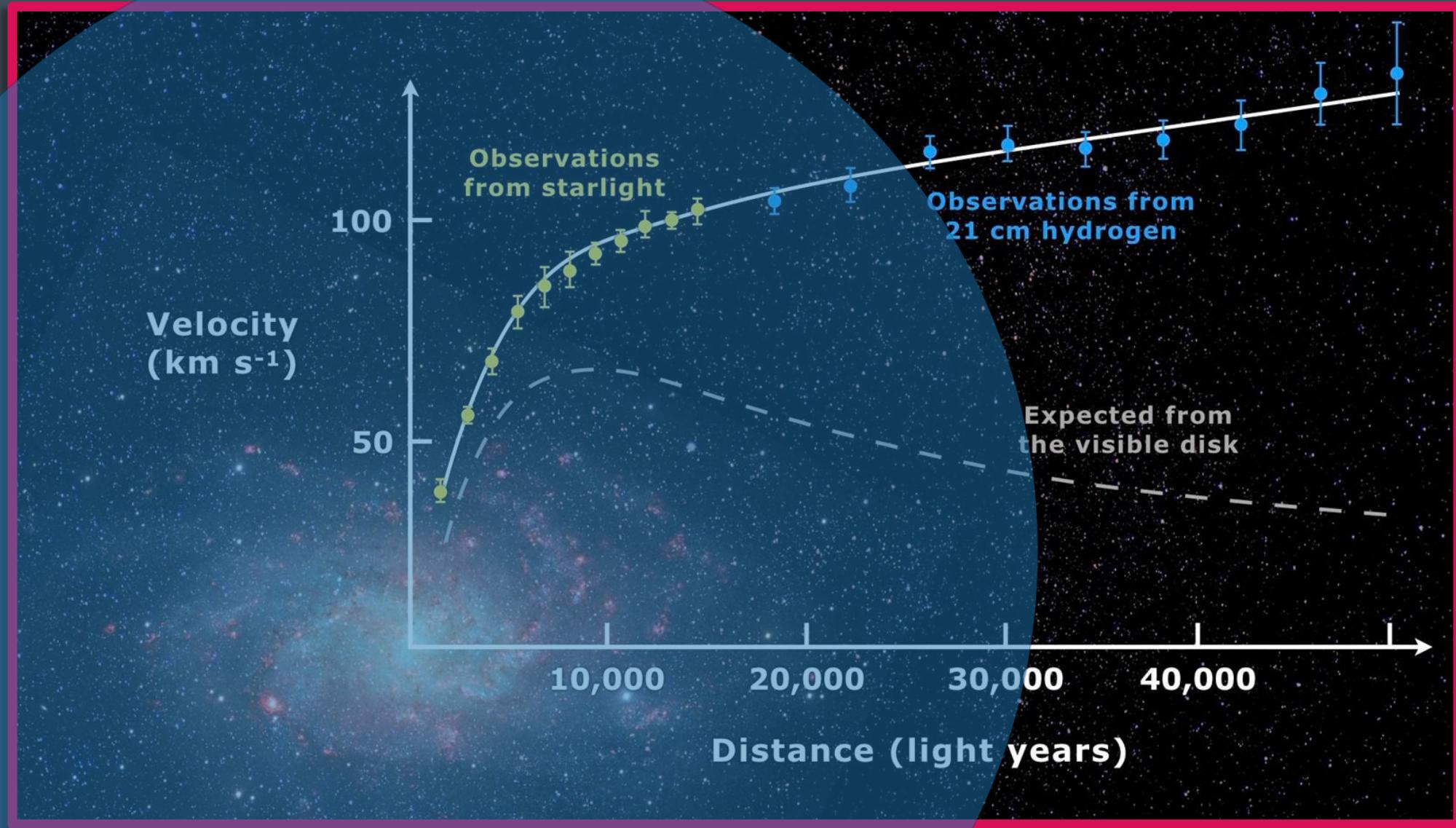


Neither high nor low luminosity Sc galaxies have falling rotation curves. Sc galaxies of all luminosities must have significant mass located beyond the optical image.

Les courbes de rotation des galaxies



Les courbes de rotation des galaxies



Les courbes de rotation des galaxies



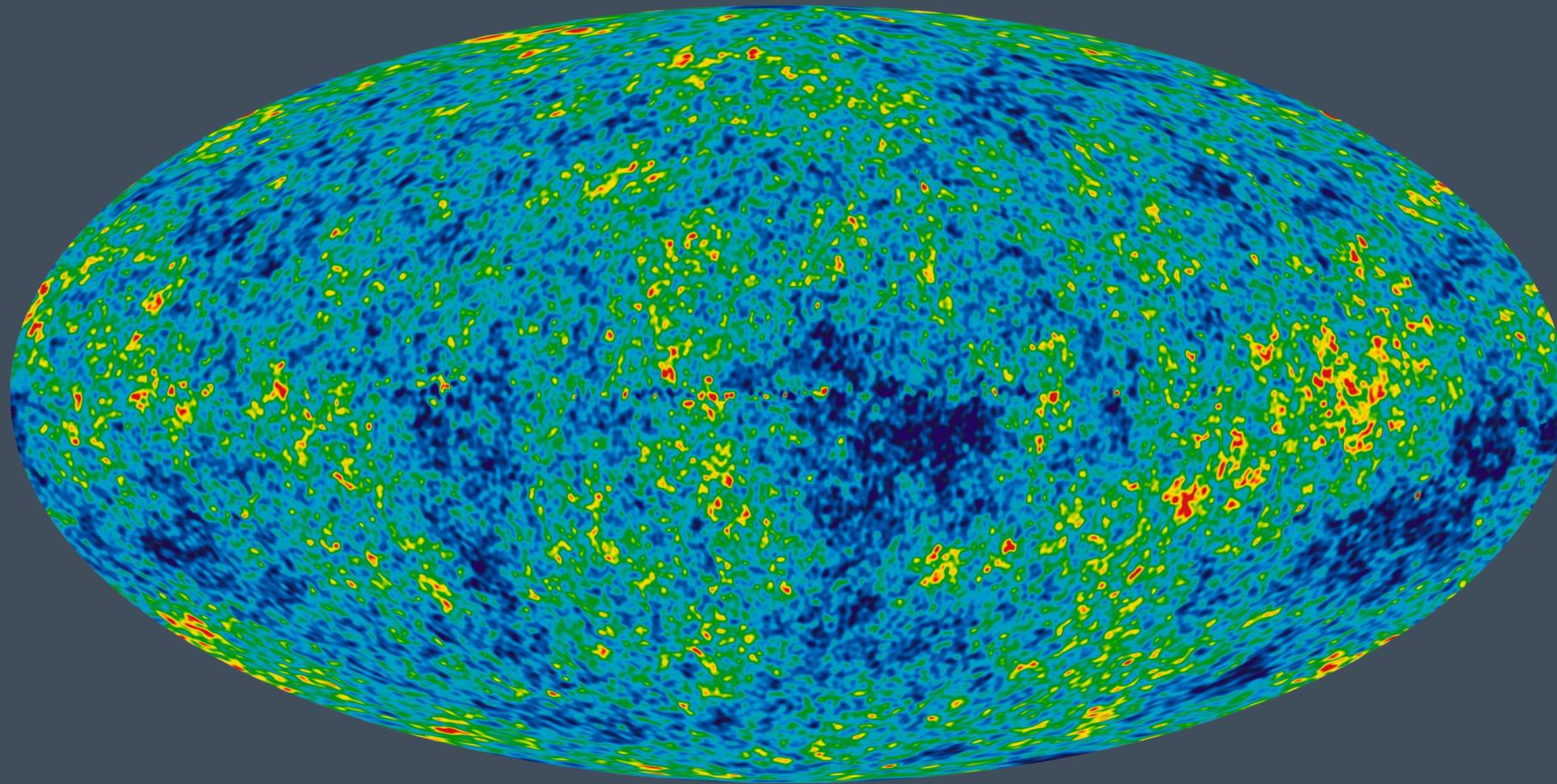
Les galaxies sont plongées dans des halos de matière noire plus grands et plus massifs que la partie visible (// iceberg)

10,000 20,000 30,000 40,000

Distance (light years)

Le fond diffus cosmologique

Le fond diffus cosmologique

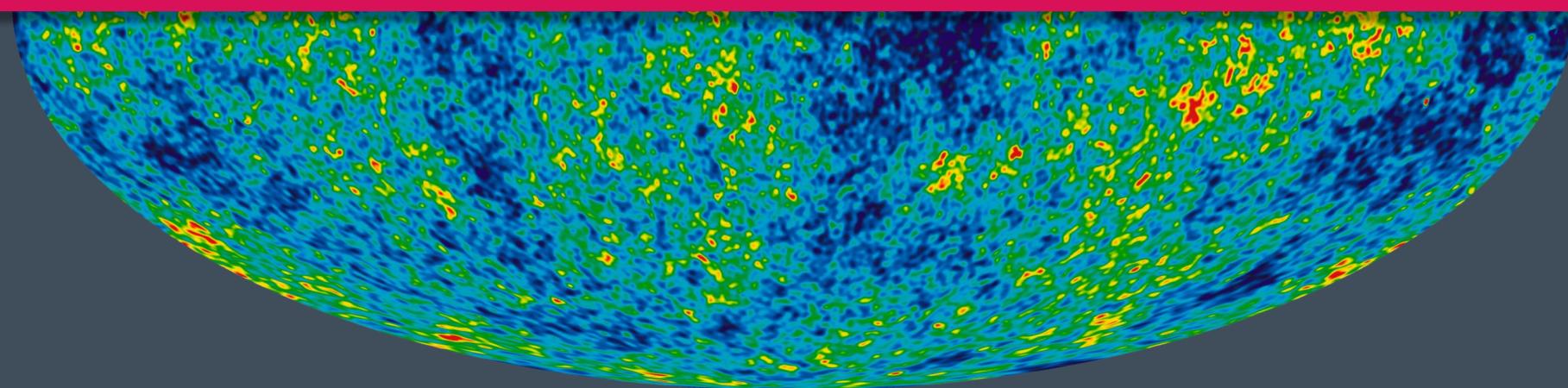


Le fond diffus cosmologique

STRUCTURE IN THE COBE¹ DIFFERENTIAL MICROWAVE RADIOMETER FIRST-YEAR MAPS

G. F. SMOOT,² C. L. BENNETT,³ A. KOGUT,⁴ E. L. WRIGHT,⁵ J. AYMON,² N. W. BOGESS,³ E. S. CHENG,³
G. DE AMICI,² S. GULKIS,⁶ M. G. HAUSER,³ G. HINSHAW,⁴ P. D. JACKSON,⁷ M. JANSSEN,⁶
E. KAITA,⁷ T. KELSALL,³ P. KEEGSTRA,⁷ C. LINEWEAVER,² K. LOEWENSTEIN,⁷ P. LUBIN,⁸
J. MATHER,³ S. S. MEYER,⁹ S. H. MOSELEY,³ T. MURDOCK,¹⁰ L. ROKKE,⁷
R. F. SILVERBERG,³ L. TENORIO,² R. WEISS,⁹ AND D. T. WILKINSON¹¹

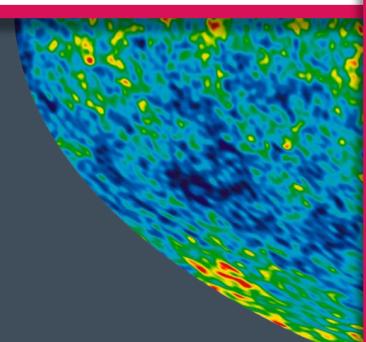
Received 1992 April 21; accepted 1992 June 12



Le fond diffus cosmologique

STRUCTURE IN THE COBE DMR MAPS

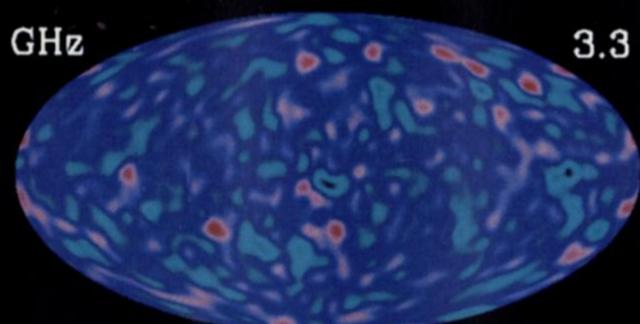
G. F. SMOOT,² C. L. BENNETT,¹
G. DE AMICI,² S. COHEN,³
E. KAITA,⁷ T. KELLEY,⁸
J. MATHEWS,⁹
R. F. SHAW,¹⁰



COBE DMR (A-B)/2 MAPS

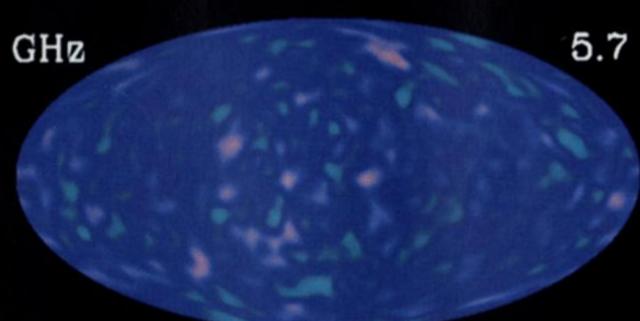
90 GHz

3.3 mm



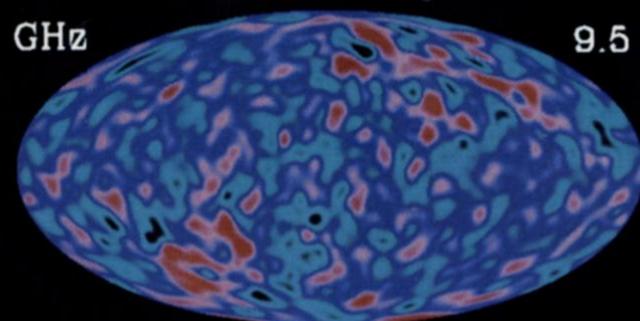
53 GHz

5.7 mm



31 GHz

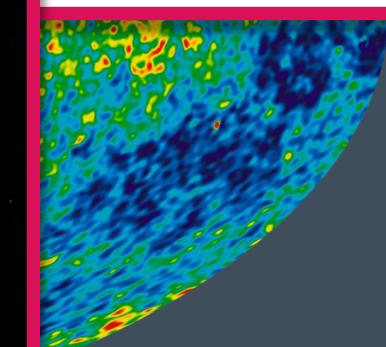
9.5 mm



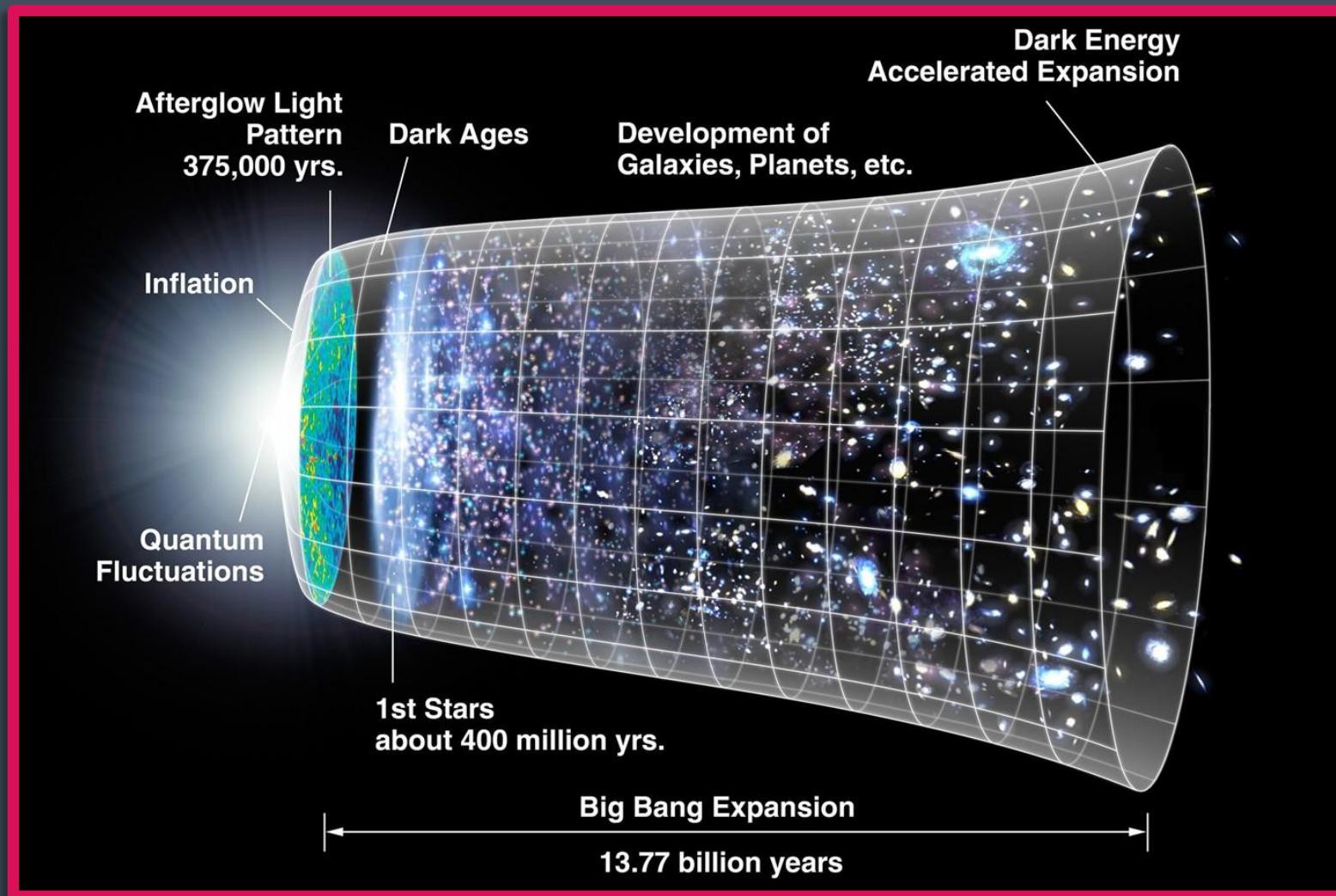
12/89 - 12/90

STRUCTURE IN THE FIRST-YEAR MAPS

BOGESS,³ E. S. CHENG,³
COHEN,⁷ M. JANSSEN,⁶
STEIN,⁷ P. LUBIN,⁸
ROKKE,⁷
THONSON¹¹



L'Univers en expansion

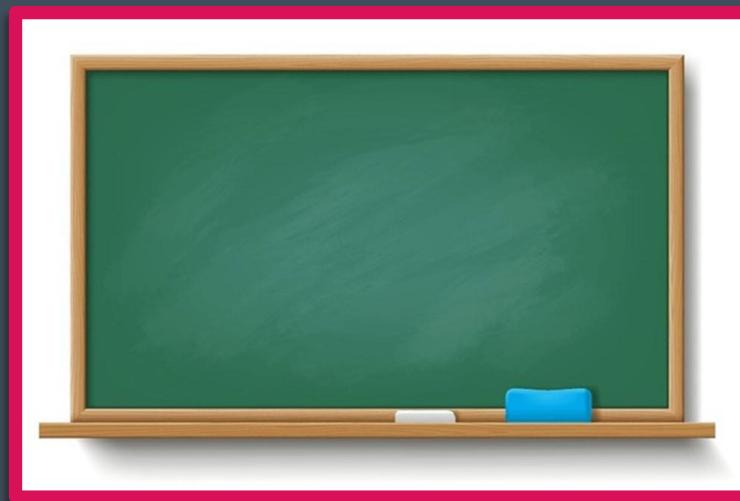


L'Univers en expansion

L'univers, juste après le Big Bang, est très dense et chaud. Il est constitué notamment de photons (lumière), et de particules chargées comme des électrons.

La force électromagnétique

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r}$$



La diffusion Thomson

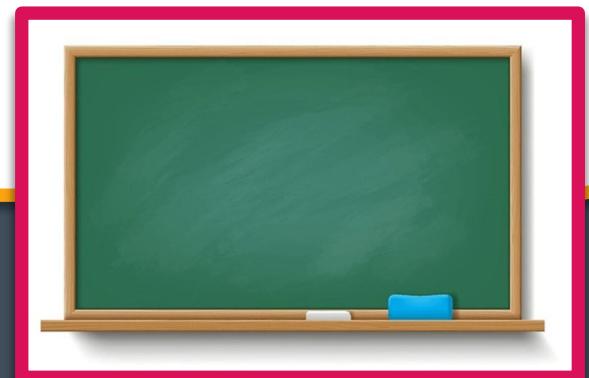
Diffusion Thomson: $\sigma_t = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{\alpha \hbar c}{mc^2} \right)^2$

avec $\alpha = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$ ('constante de structure fine')

La diffusion Thomson

Diffusion Thomson: $\sigma_t = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{\alpha \hbar c}{mc^2} \right)^2$

avec $\alpha = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$ ('constante de structure fine')



La diffusion Thomson

Diffusion Thomson: $\sigma_t = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{\alpha \hbar c}{mc^2} \right)^2$

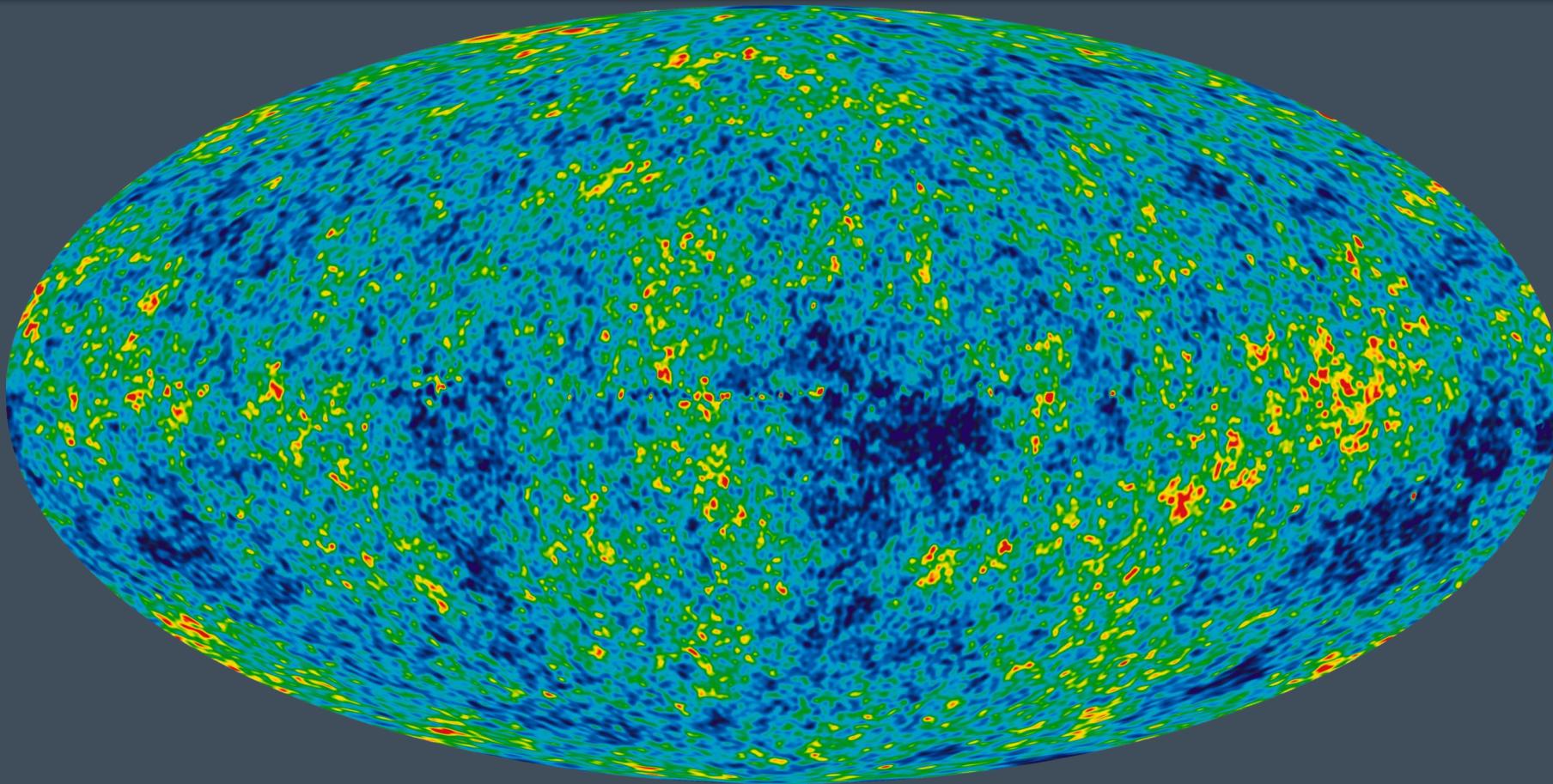
avec $\alpha = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$ ('constante de structure fine')



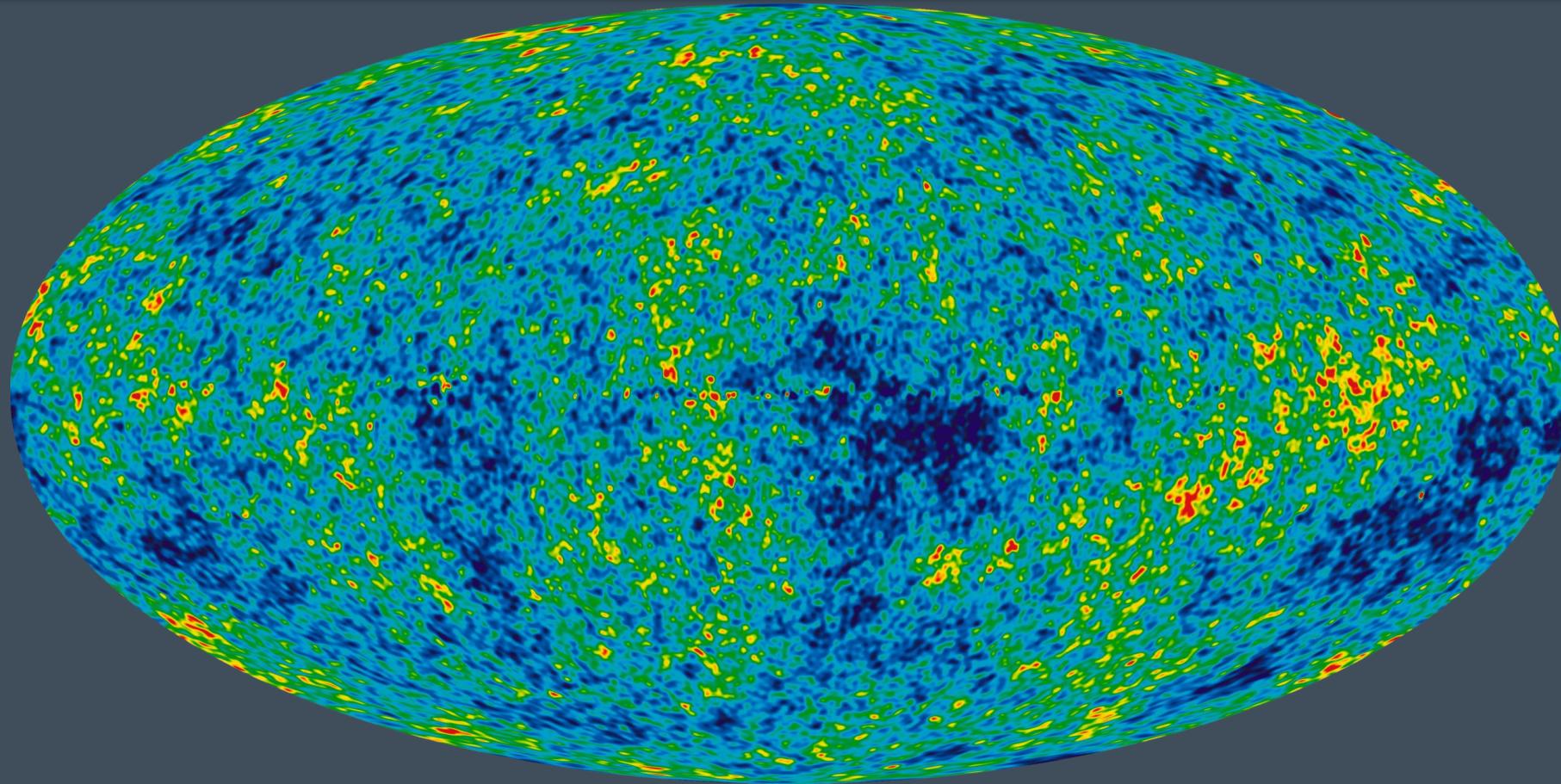
La ‘recombinaison’ et la libération des photons

- Les photons rebondissent sur les électrons, et acquièrent une énergie comparable à ceux-ci localement.
- L’Univers s’étend et se refroidit, les électrons et les protons finissent par se combiner pour former des atomes **NEUTRES**.
- Les photons cessent de rebondir, et se propagent librement, jusqu’à nous!
- Donne une trace de l’Univers 380 000 ans après le Big Bang.

Le fond diffus cosmologique



Le fond diffus cosmologique

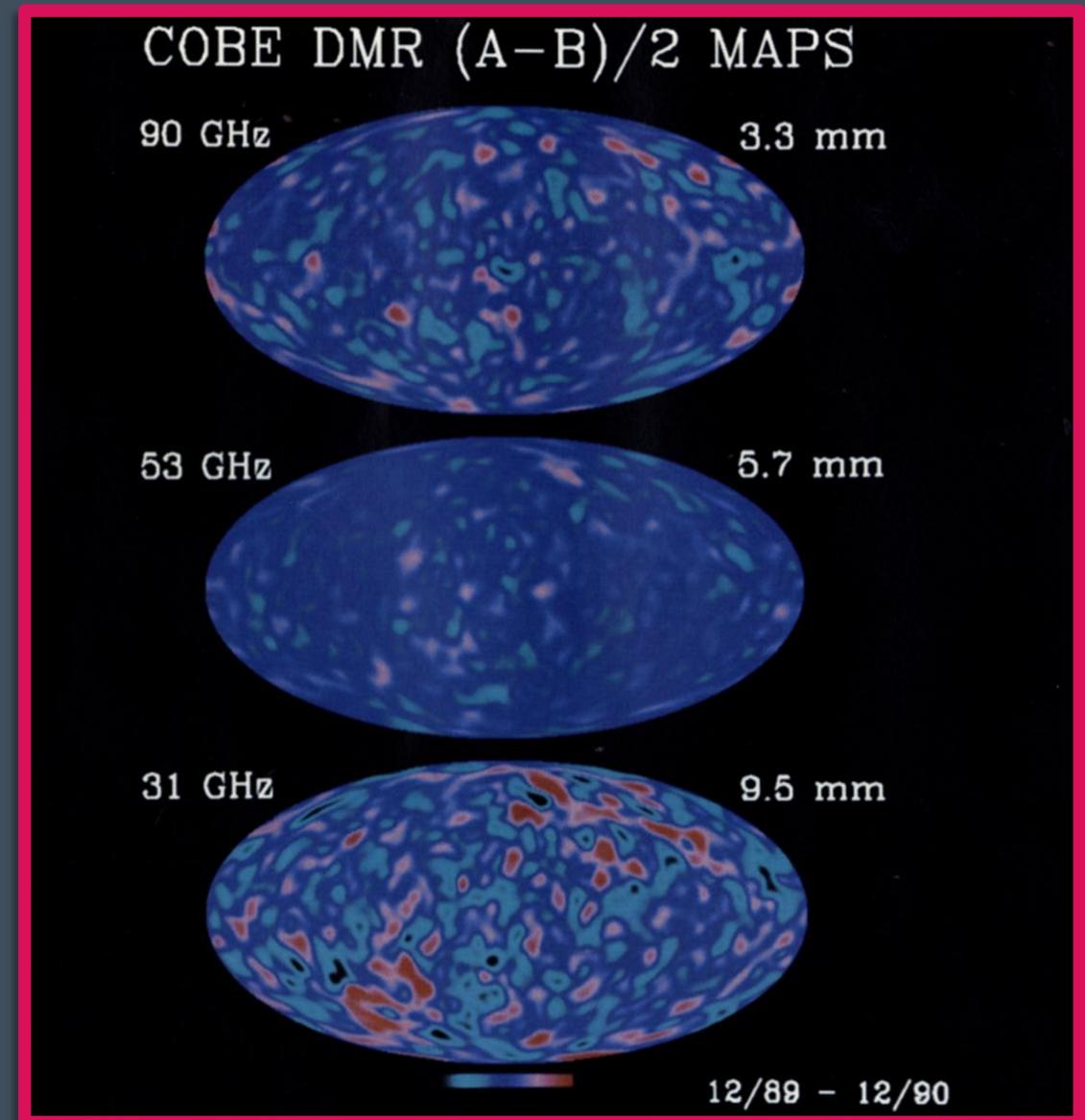


Plus vieille lumière de l'Univers !

COBE



1989



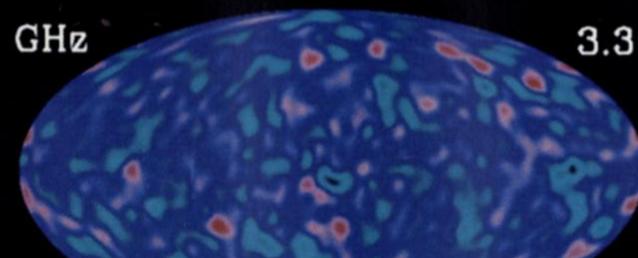
COBE



COBE DMR (A-B)/2 MAPS

90 GHz

3.3 mm

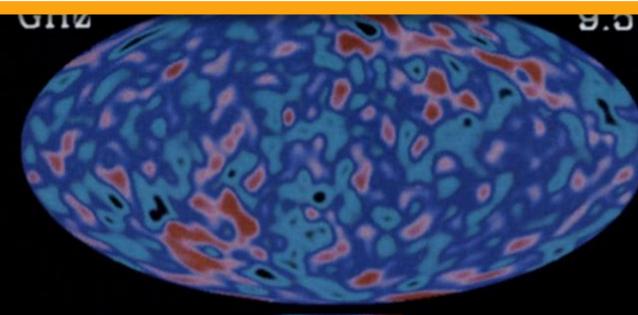


Pourquoi est-ce une indication de la présence de matière noire ?

1989

31 GHz

9.3 mm



12/89 - 12/90

COBE

Car celle-ci est nécessaire à former des zones plus ou moins denses!



1989



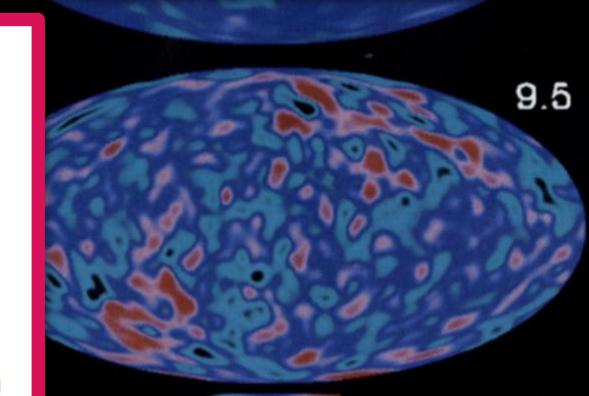
COBE DMR (A-B)/2 MAPS

90 GHz

3.3 mm

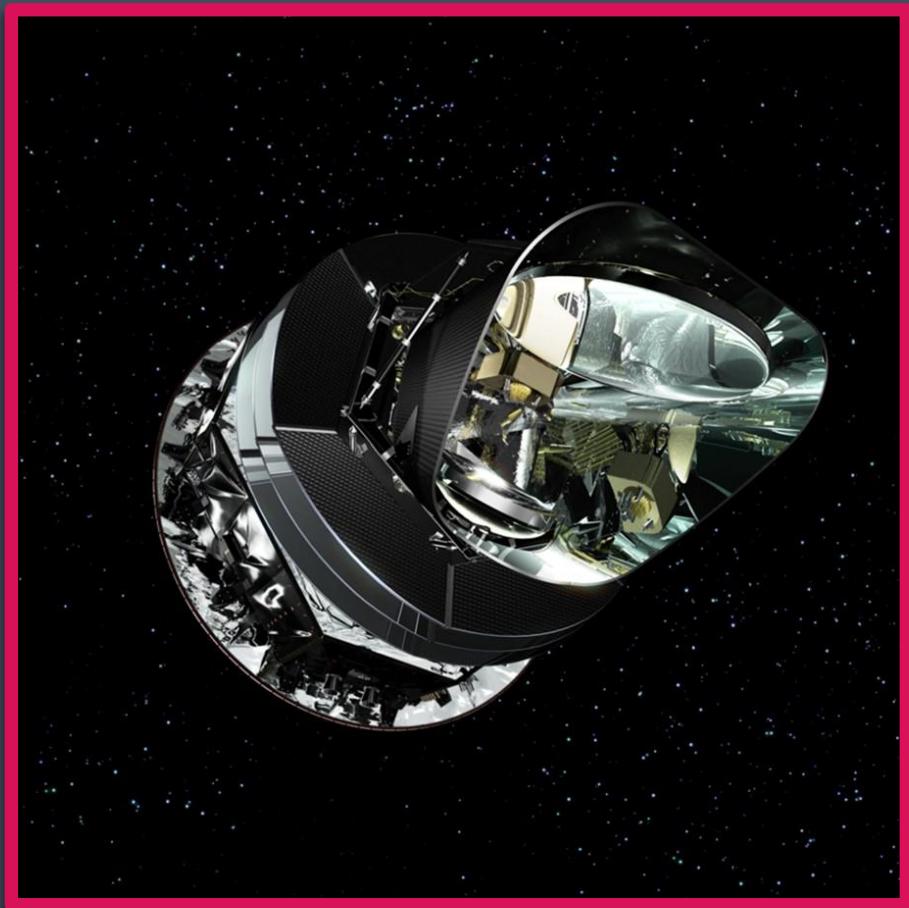


9.5 mm

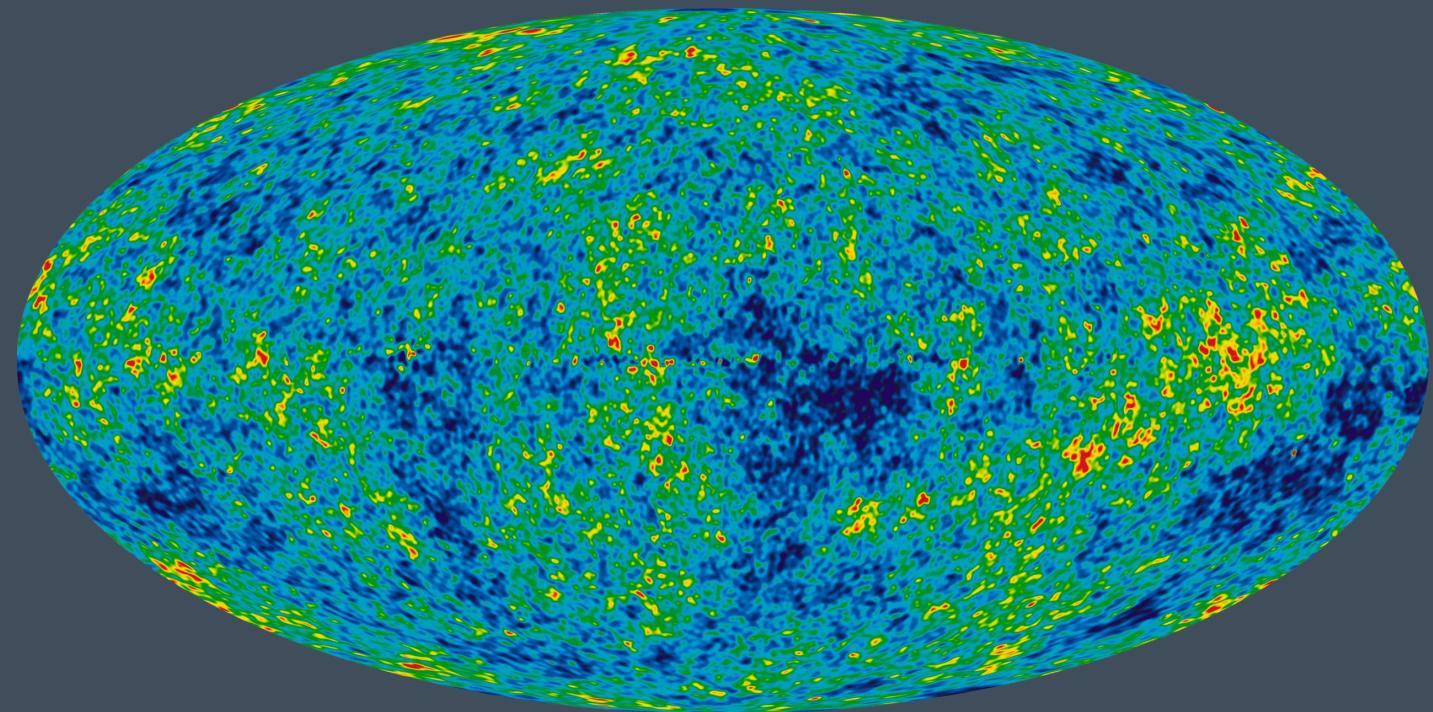


12/89 - 12/90

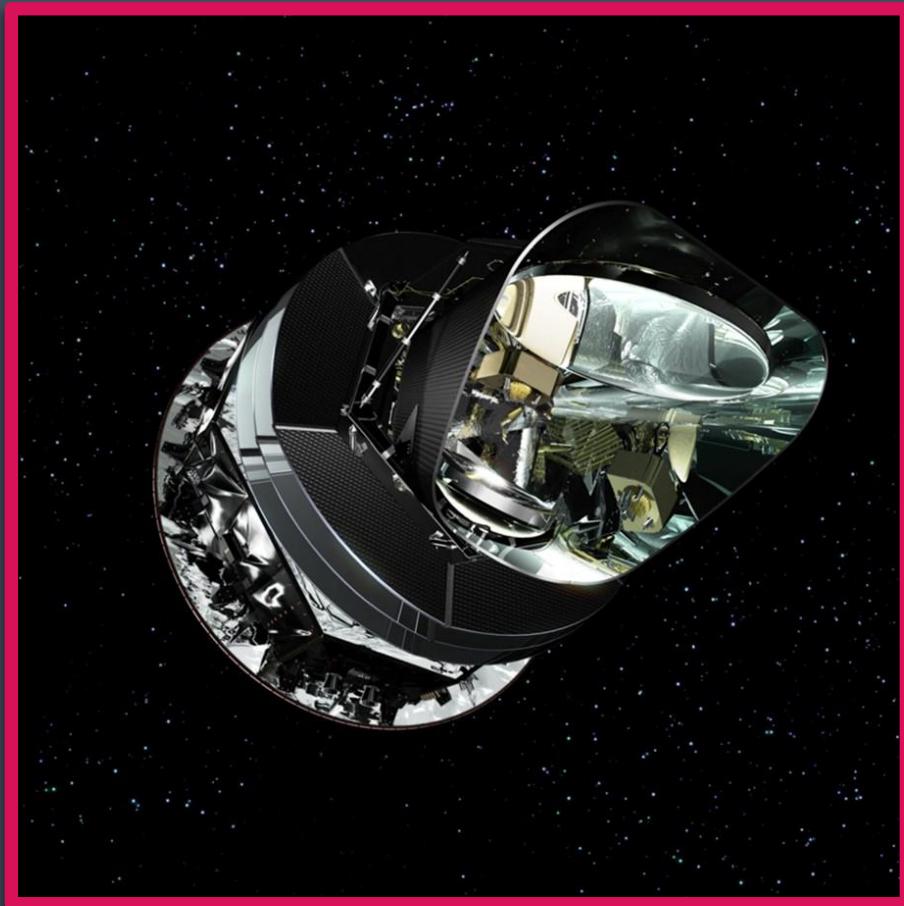
Planck



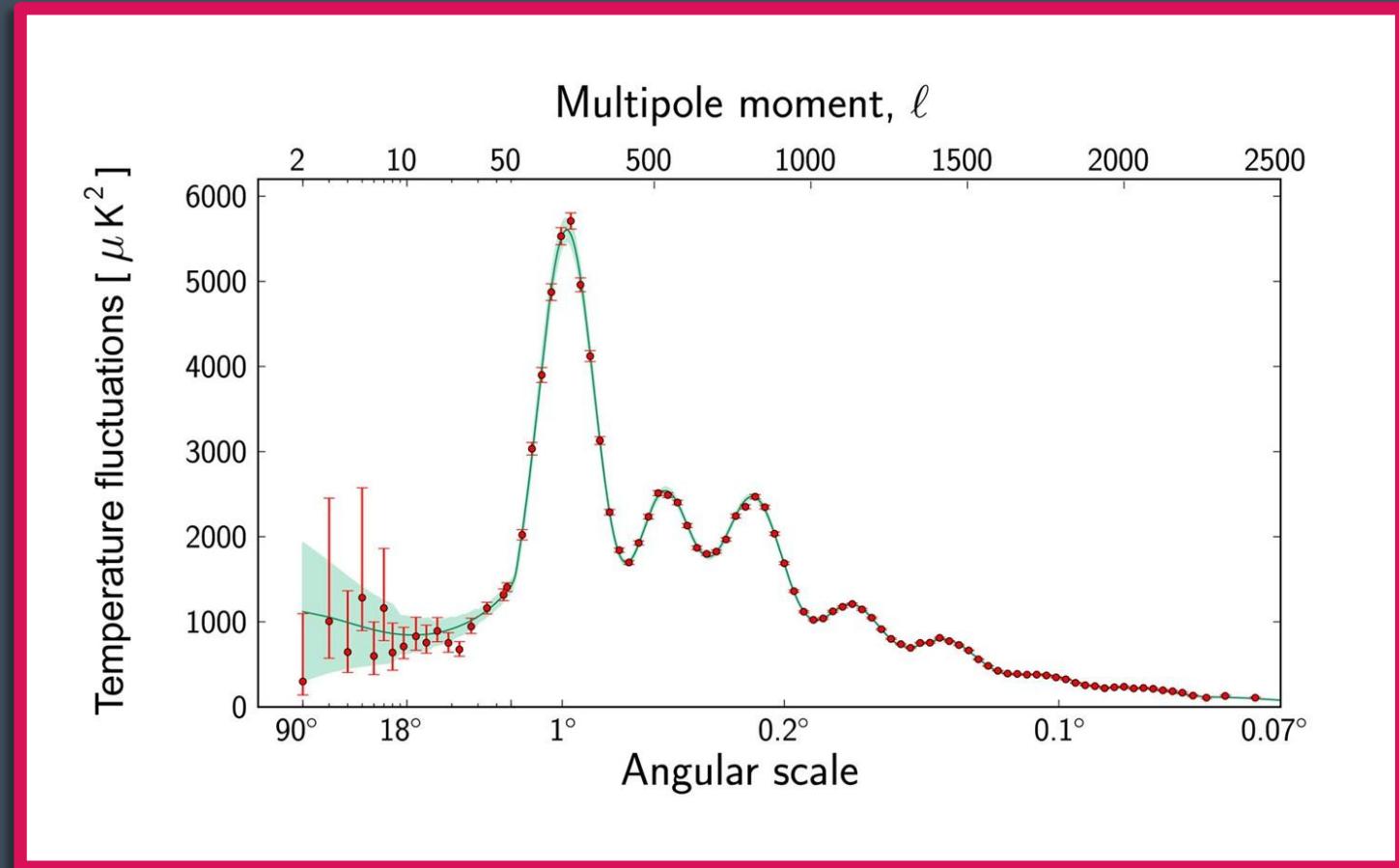
2009



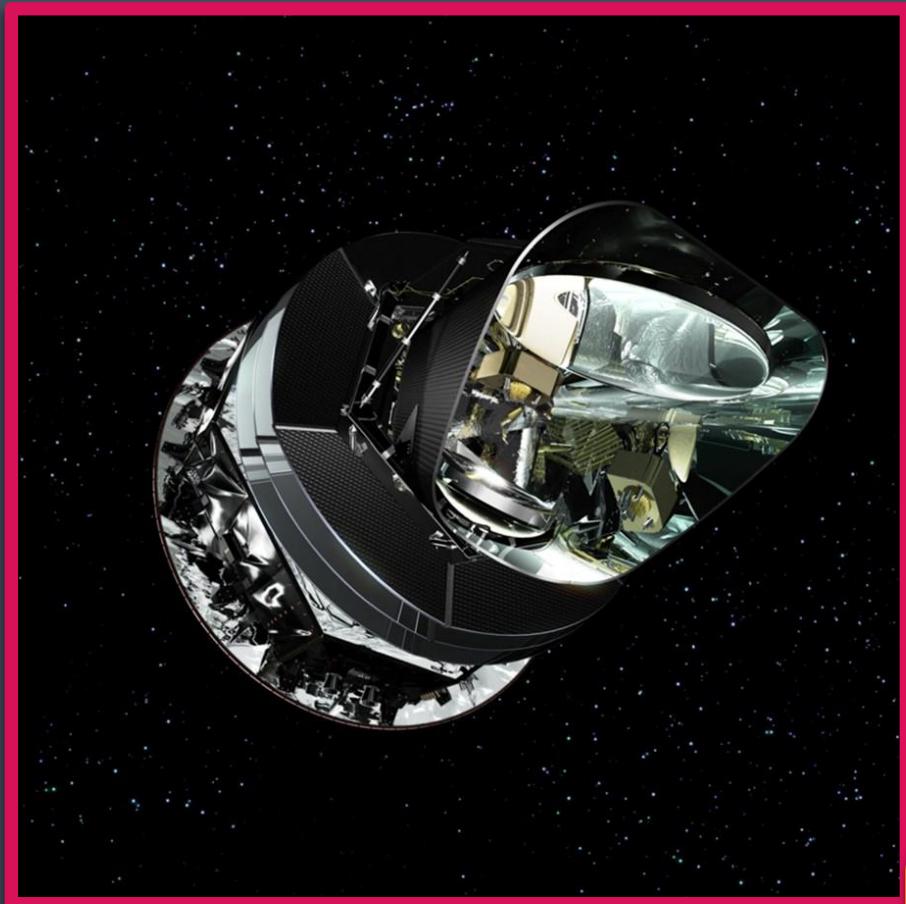
Planck



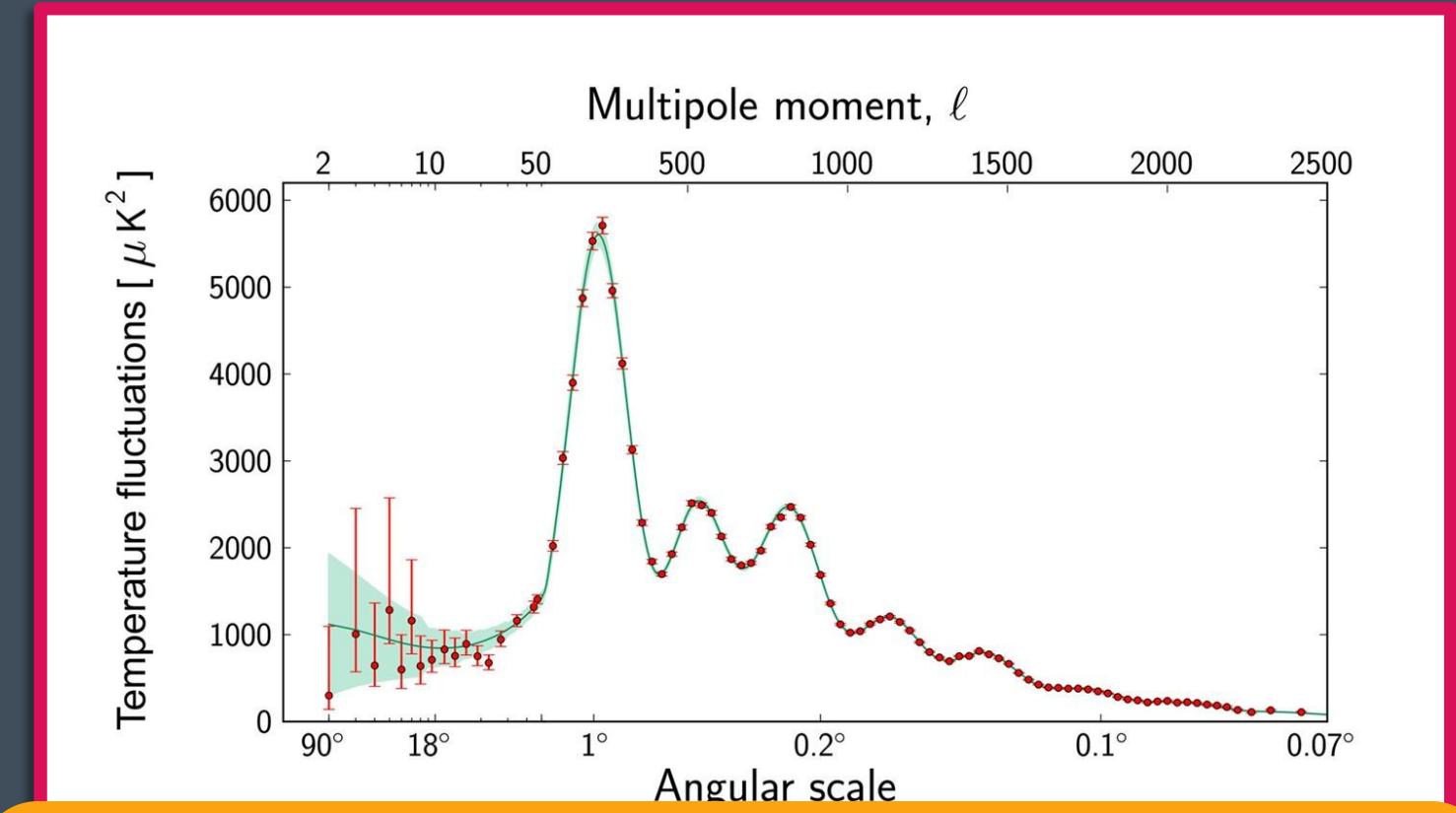
2009



Planck



2009



Modèle d'une précision exceptionnelle!

Amas de la balle de fusil ('bullet cluster')



Découvert en 1992 par l'observatoire Einstein

Amas de la balle de fusil ('bullet cluster')



Quoi de nouveau ? Zwicky a déjà étudié la vitesse des galaxies dans les amas il y a 60 ans...



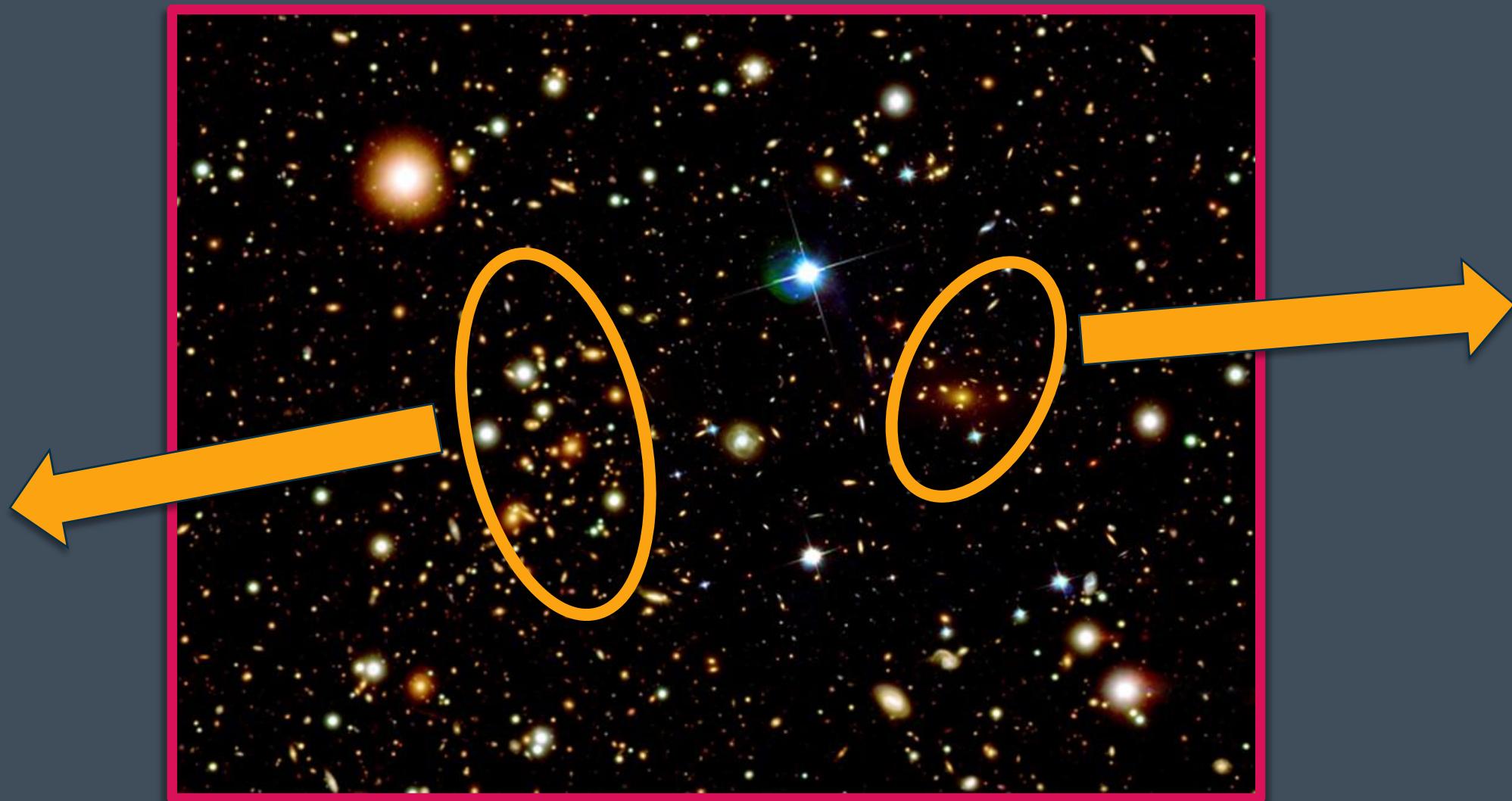
Découvert en 1992 par l'observatoire Einstein

Amas de la balle de fusil ('bullet cluster')



Découvert en 1992 par l'observatoire Einstein

Amas de la balle de fusil ('bullet cluster')



Découvert en 1992 par l'observatoire Einstein

Amas de la balle de fusil ('bullet cluster')

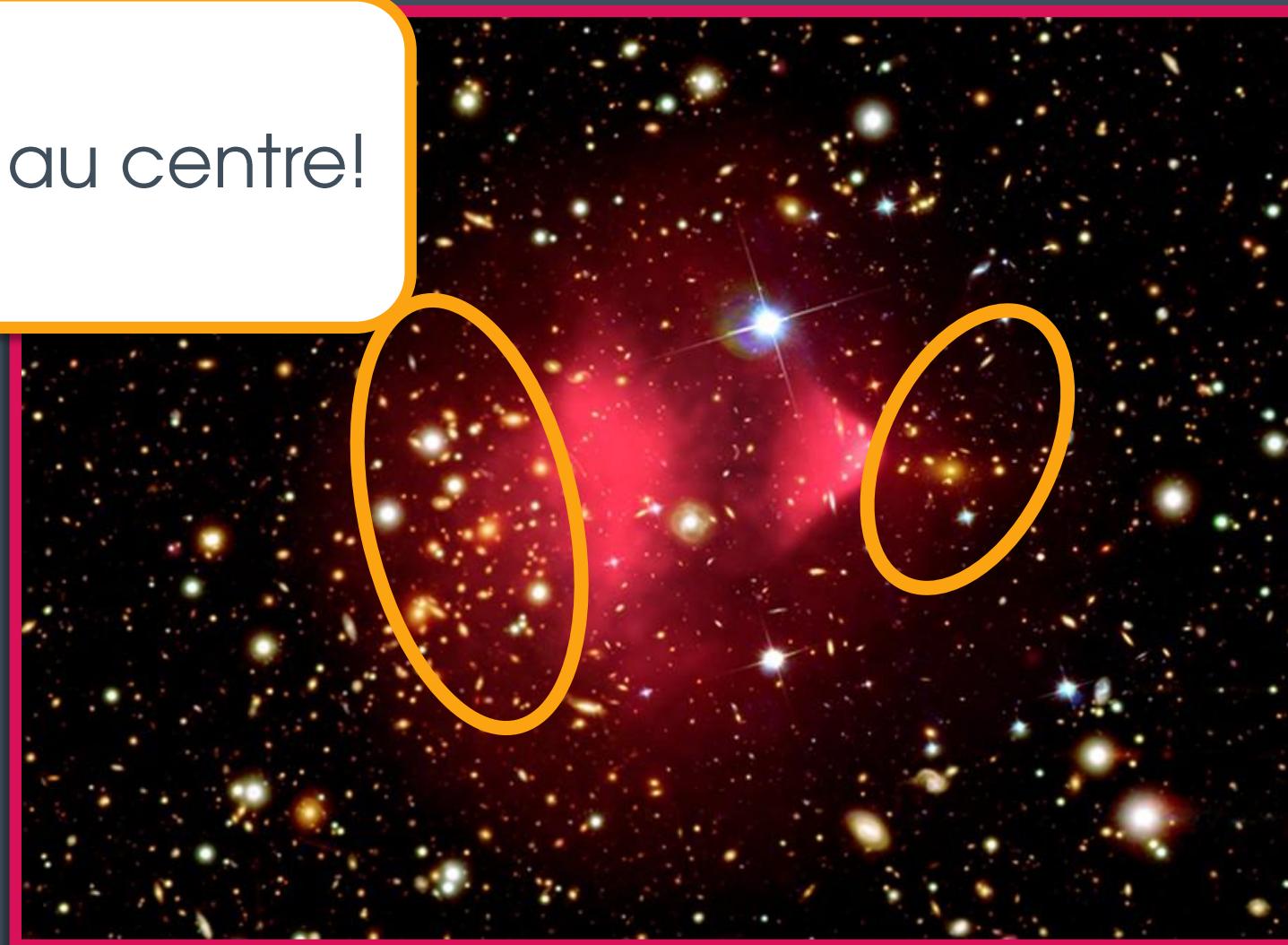
Dans cet amas, le gaz est très chaud (10^7 K).
Où est le gaz ?



Découvert en 1992 par l'observatoire Einstein

Amas de la balle de fusil ('bullet cluster')

Le gaz reste au centre!



Découvert en 1992 par l'observatoire Einstein

Amas de la balle de fusil ('bullet cluster')

Le gaz reste au centre!



Pourquoi?

$$\vec{F}_g = -\frac{Gm_1m_2}{r^3} \vec{r}$$

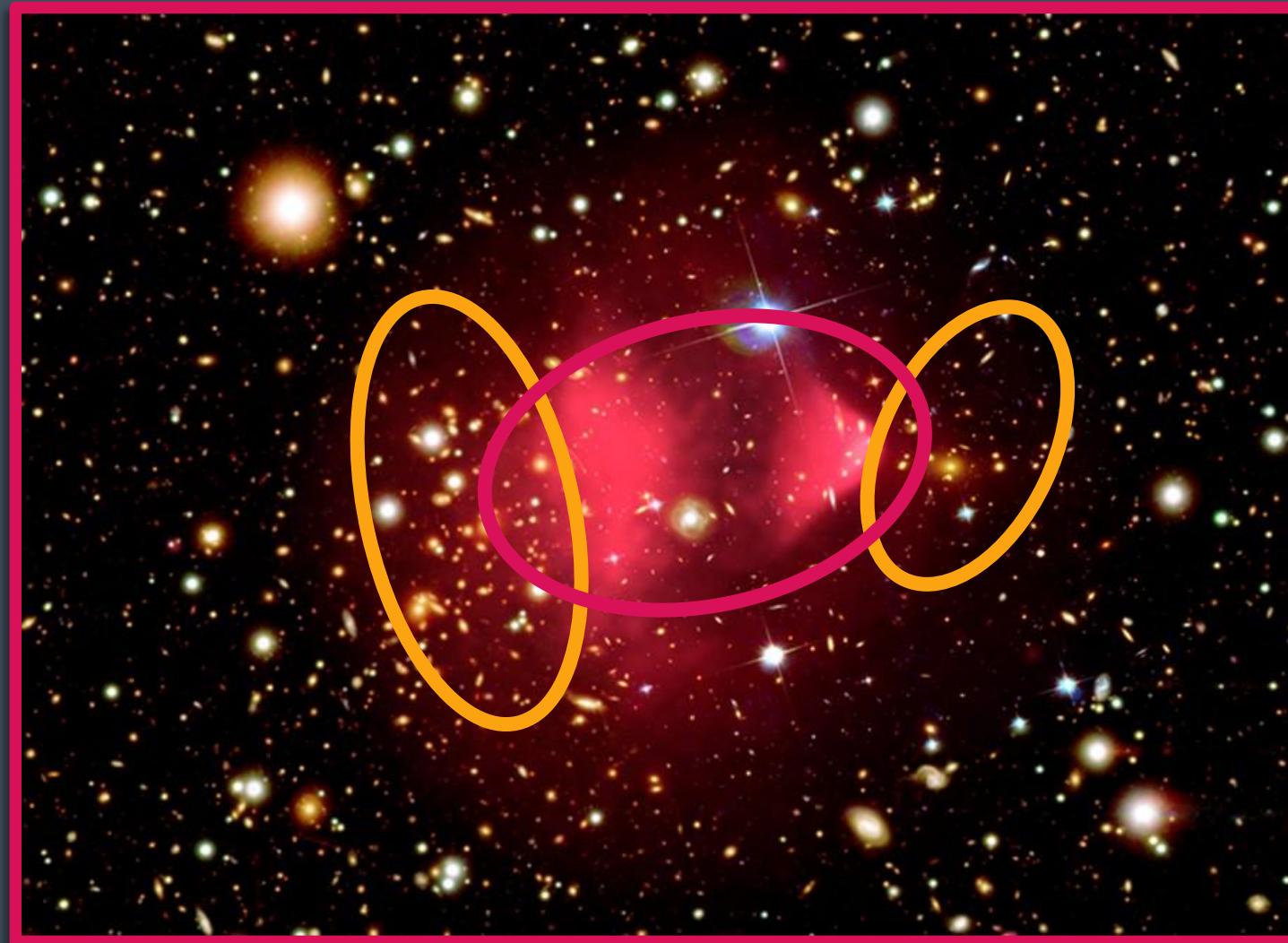
VS

$$\vec{F}_e = \frac{q_1q_2}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r}$$



Découvert en 1992 par l'observatoire

Amas de la balle de fusil ('bullet cluster')



Amas de la balle de fusil ('bullet cluster')



A DIRECT EMPIRICAL PROOF OF THE EXISTENCE OF DARK MATTER *

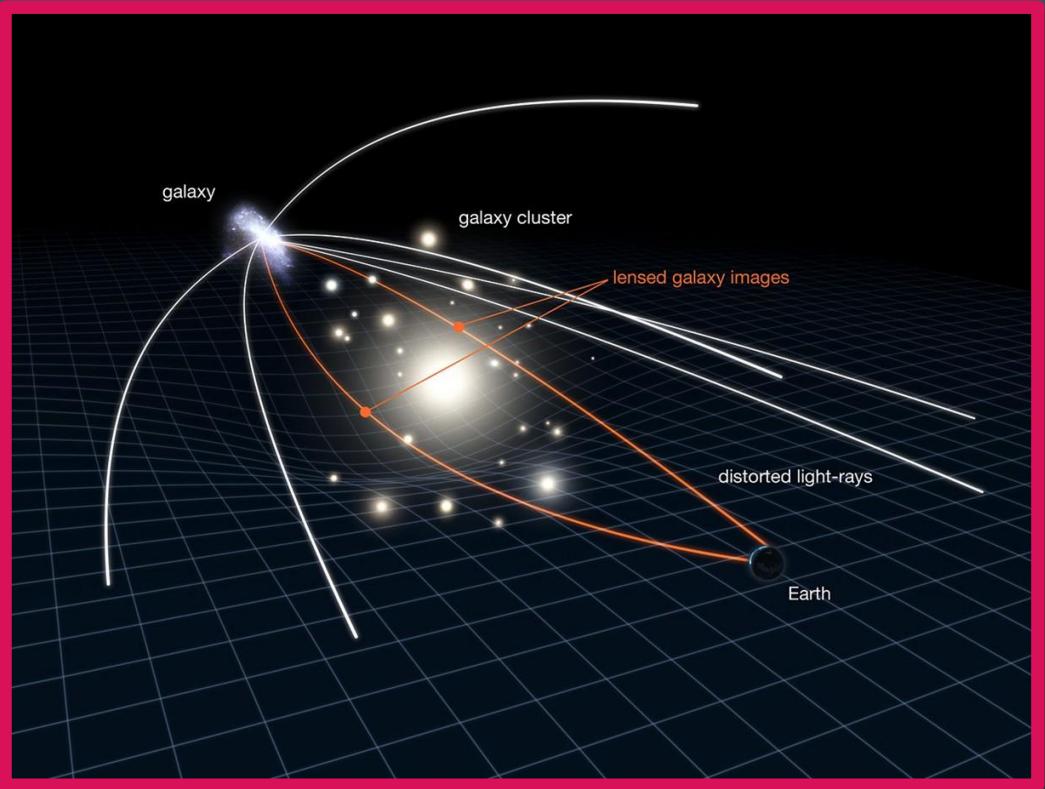
DOUGLAS CLOWE¹, MARUŠA BRADAČ², ANTHONY H. GONZALEZ³, MAXIM MARKEVITCH^{4,5}, SCOTT W. RANDALL⁴,
CHRISTINE JONES⁴, AND DENNIS ZARITSKY¹

ApJ Letters in press

2006



L'effet de lentille gravitationnelle



$$\hat{\alpha} = \frac{4GM}{c^2 b} \text{ (pour une masse ponctuelle)}$$

L'effet de lentille gravitationnelle



Relativité générale: la masse distord la lumière venant de l'arrière-plan!

$$\hat{\alpha} = \frac{4GM}{c^2 b} \text{ (pour une masse ponctuelle)}$$

Amas de la balle de fusil



Ratio: ~90% de la masse
'classique' est sous forme de
gaz, le reste sous forme d'étoiles

Amas de la balle de fusil

Appliquons les mesures d'effets de lentille gravitationnelle. Où devrait se trouver la plupart de la masse?



Amas de la balle de fusil



Amas de la balle de fusil

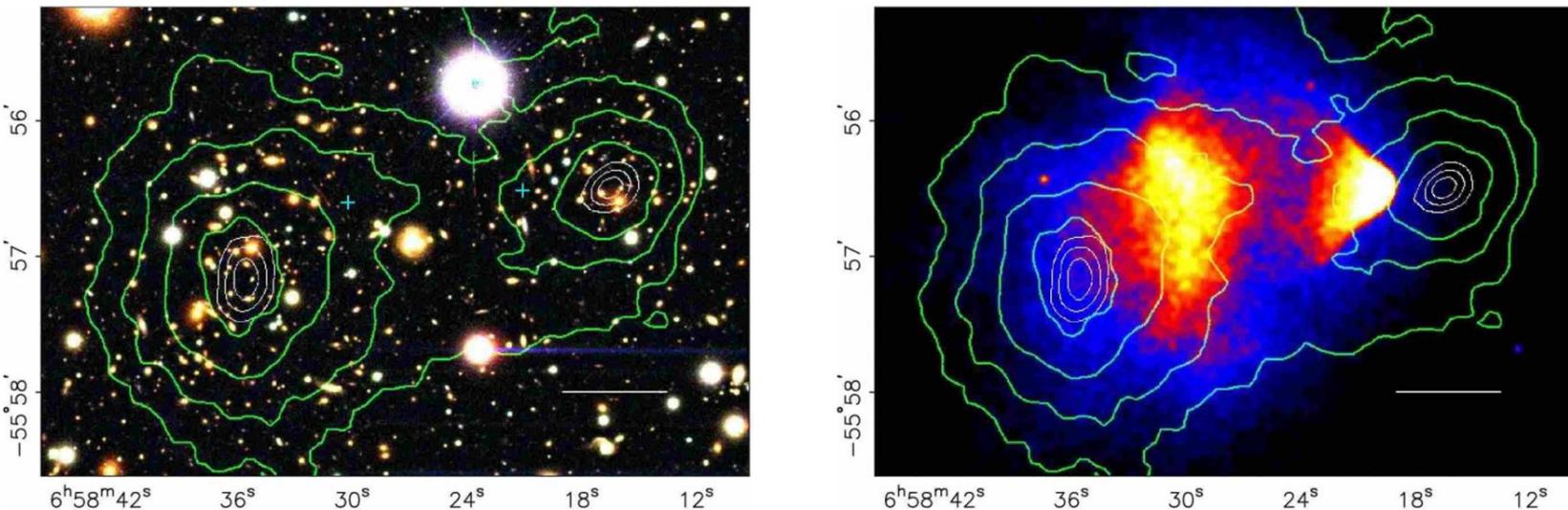


FIG. 1.— Shown above in the top panel is a color image from the Magellan images of the merging cluster 1E0657–558, with the white bar indicating 200 kpc at the distance of the cluster. In the bottom panel is a 500 ks Chandra image of the cluster. Shown in green contours in both panels are the weak lensing κ reconstruction with the outer contour level at $\kappa = 0.16$ and increasing in steps of 0.07. The white contours show the errors on the positions of the κ peaks and correspond to 68.3%, 95.5%, and 99.7% confidence levels. The blue +s show the location of the centers used to measure the masses of the plasma clouds in Table 2.

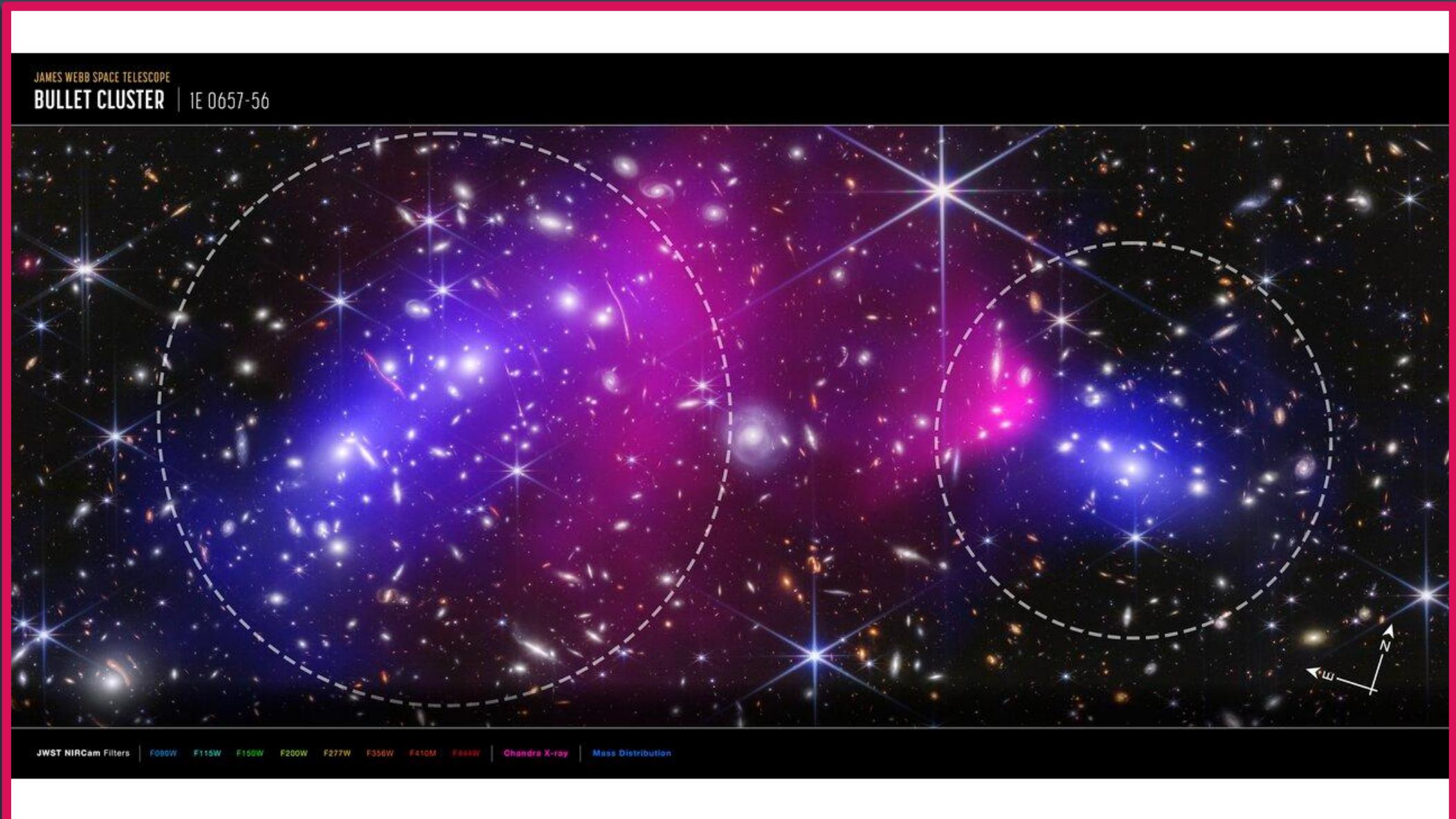
Amas de la balle de fusil

dunkle Materie



FIG. 1.— Shown above in the top panel is a color image from the Magellan images of the merging cluster 1E0657–558, with the white bar indicating 200 kpc at the distance of the cluster. In the bottom panel is a 500 ks Chandra image of the cluster. Shown in green contours in both panels are the weak lensing κ reconstruction with the outer contour level at $\kappa = 0.16$ and increasing in steps of 0.07. The white contours show the errors on the positions of the κ peaks and correspond to 68.3%, 95.5%, and 99.7% confidence levels. The blue +s show the location of the centers used to measure the masses of the plasma clouds in Table 2.

Amas de la balle de fusil

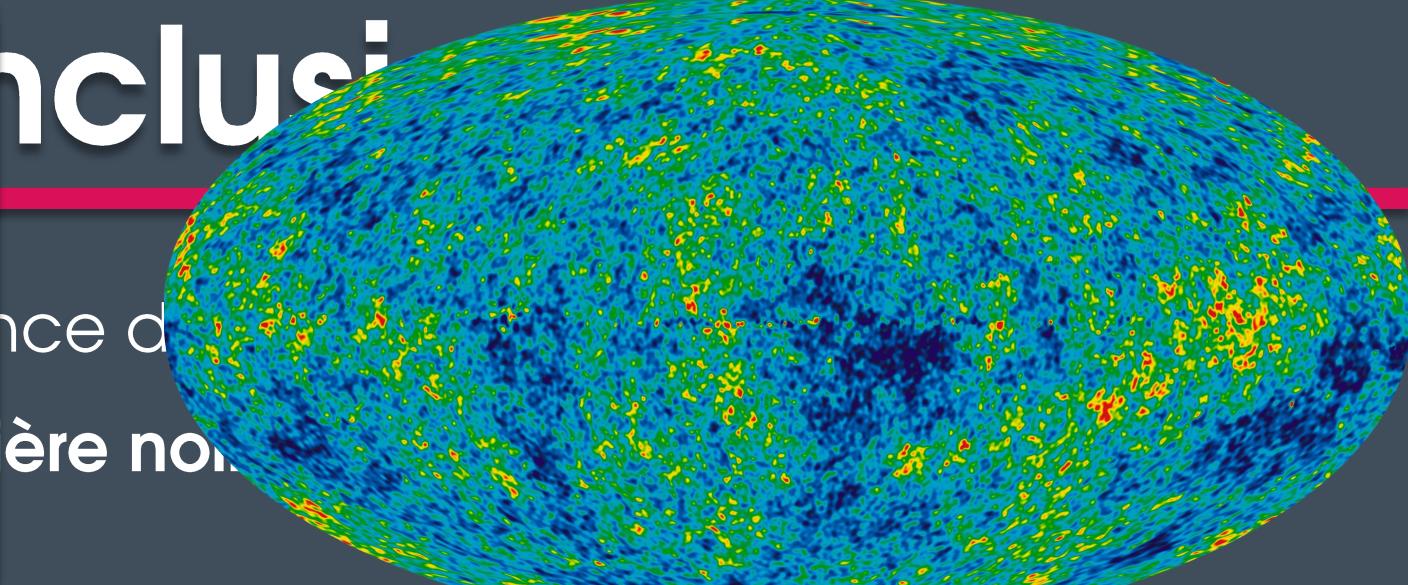


Conclusions

Conclusions

- Différentes preuves de l'existence d'une matière qui n'interagit pas électromagnétiquement: **matière noire**
- La matière noire existe, et à de nombreuses échelles, d'espace mais aussi de temps: **longue durée de vie**
- Certaines mesures (fond diffus cosmologique) nous donnent des informations très précises sur certaines propriétés: **non-relativiste**
- Nous pouvons construire des modèles qui tentent d'expliquer cette matière en connaissant ces quelques propriétés ! (Approche théorique)

- Différentes échelles
 - La nature de tout
 - Certaines informations
 - Nouvelles propriétés
- Inclus dans la dernière note :
- Nombreuses échelles mais aussi
 - Des cosmologues certaines modèles propriétés



Conclusions

- Différentes preuves de l'existence d'une matière qui n'interagit pas électromagnétiquement: **matière noire**
- La matière noire existe, et à de nombreuses échelles, d'espace mais aussi de temps: **longue durée de vie**
- Certaines mesures (fond diffus cosmologique) nous donnent des informations très précises sur certaines propriétés: **non-relativiste**
- Nous pouvons construire des modèles qui tentent d'expliquer cette matière en connaissant ces quelques propriétés ! (Approche théorique)

Conclusions

- Différentes preuves de l'existence d'une matière qui n'interagit pas électromagnétiquement: **matière noire**
- La mat...
de ten...
aussi
- Certain...
inform...
...
- Nous pouvons construire des modèles qui tentent d'expliquer cette matière en connaissant ces quelques propriétés ! (Approche théorique)

A la semaine
prochaine...

Votre avis compte !

Prochain cours: quels sont les principaux candidats? Approche plus théorique, plus de calculs au tableau (?) – Donnez-moi votre avis! 3 propositions:

- (1) plus de calcul
- (2) moins de calcul, j'aime bien écouter et voir les slides
- (3) j'ai rien compris et je ne reviendrai pas

Pour aller plus loin:

Gianfranco Bertone and Dan Hooper,
‘History of Dark Matter’, Published
in: *Rev.Mod.Phys.* 90 (2018) 4, 045002
e-Print: [1605.04909](https://arxiv.org/abs/1605.04909)