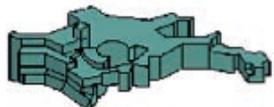
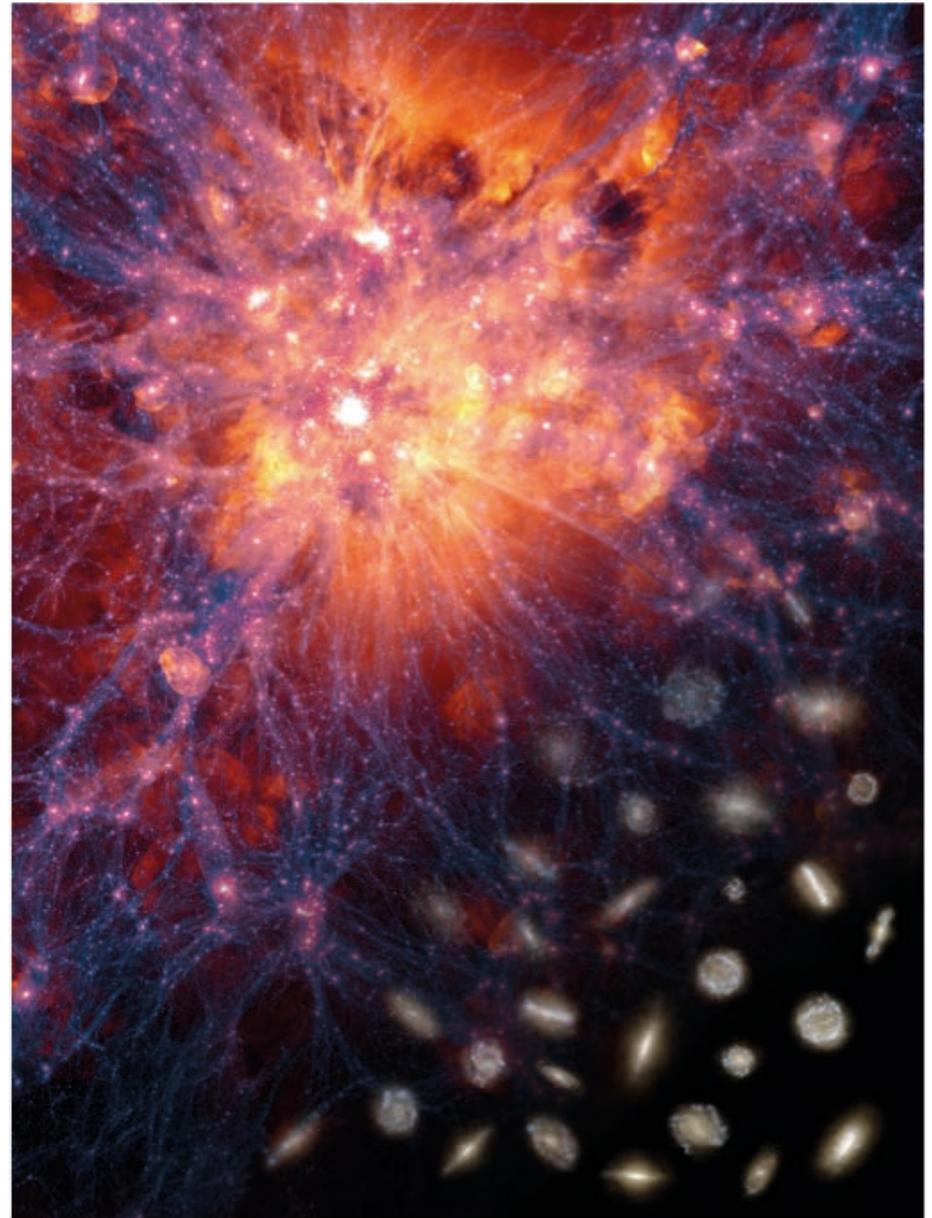


Leuchtende und dunkle Strukturen des Kosmos

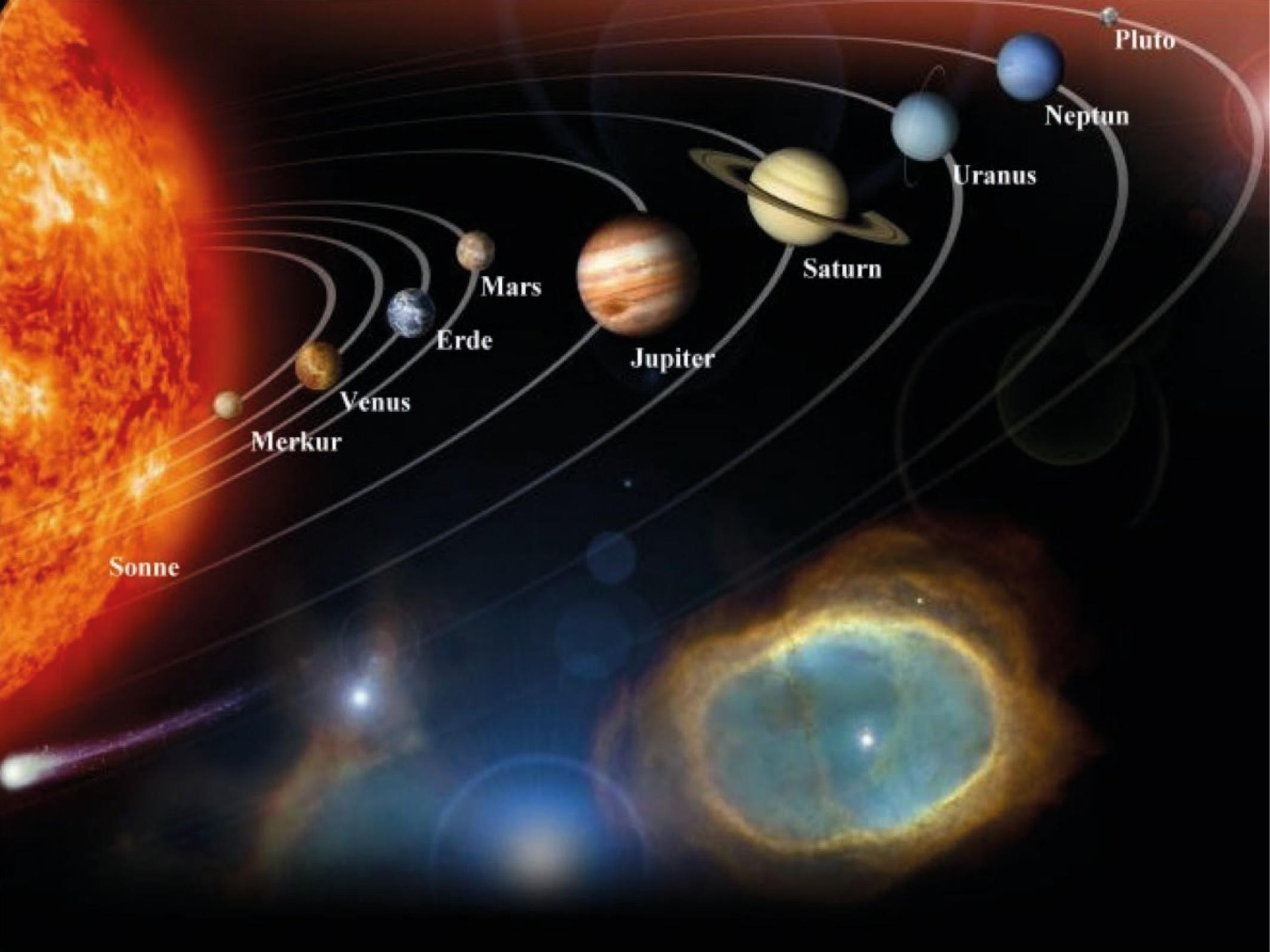
Volker Springel

- ▶ **Unsere Position im All**
- ▶ **Kosmische Großraumstruktur und die dunkle Seite des Universums**
- ▶ **Aktuelle Simulationsergebnisse: Illustris Projekt**
- ▶ **Blick in die Zukunft**



Max-Planck-Institute
for Astrophysics

Technik Forum Backnang
9. Oktober 2019



Pluto

Neptun

Uranus

Saturn

Jupiter

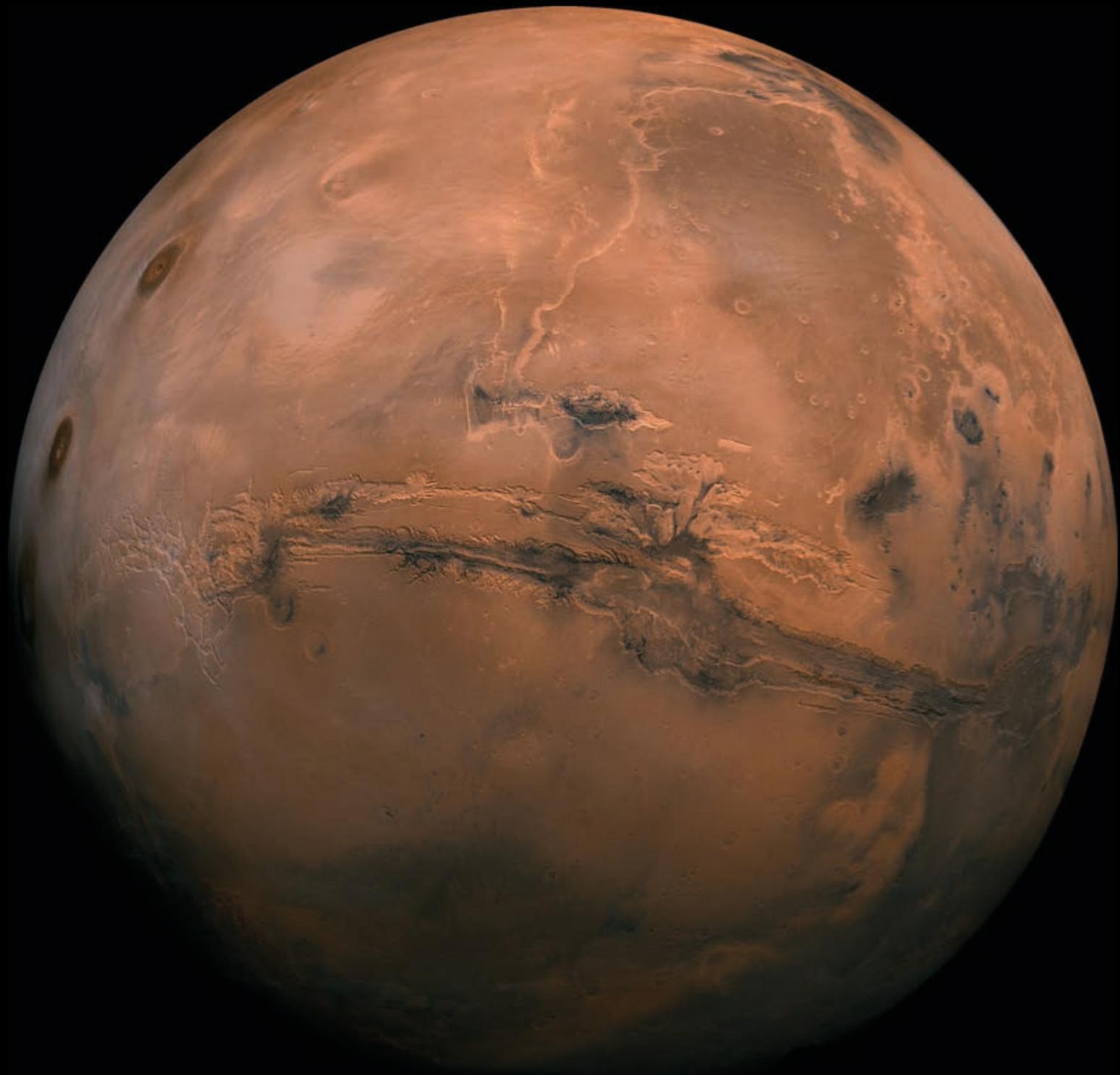
Mars

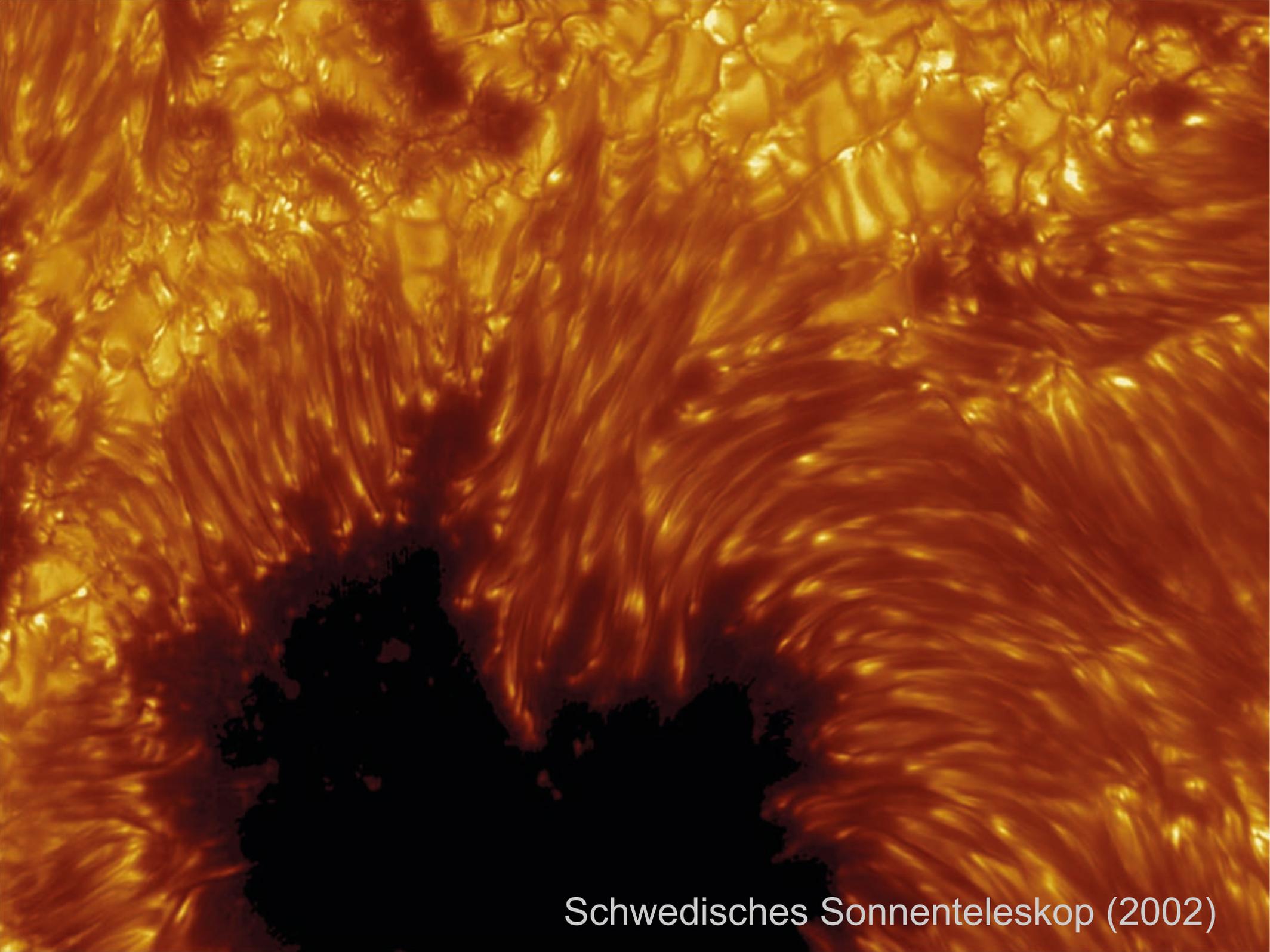
Erde

Venus

Merkur

Sonne

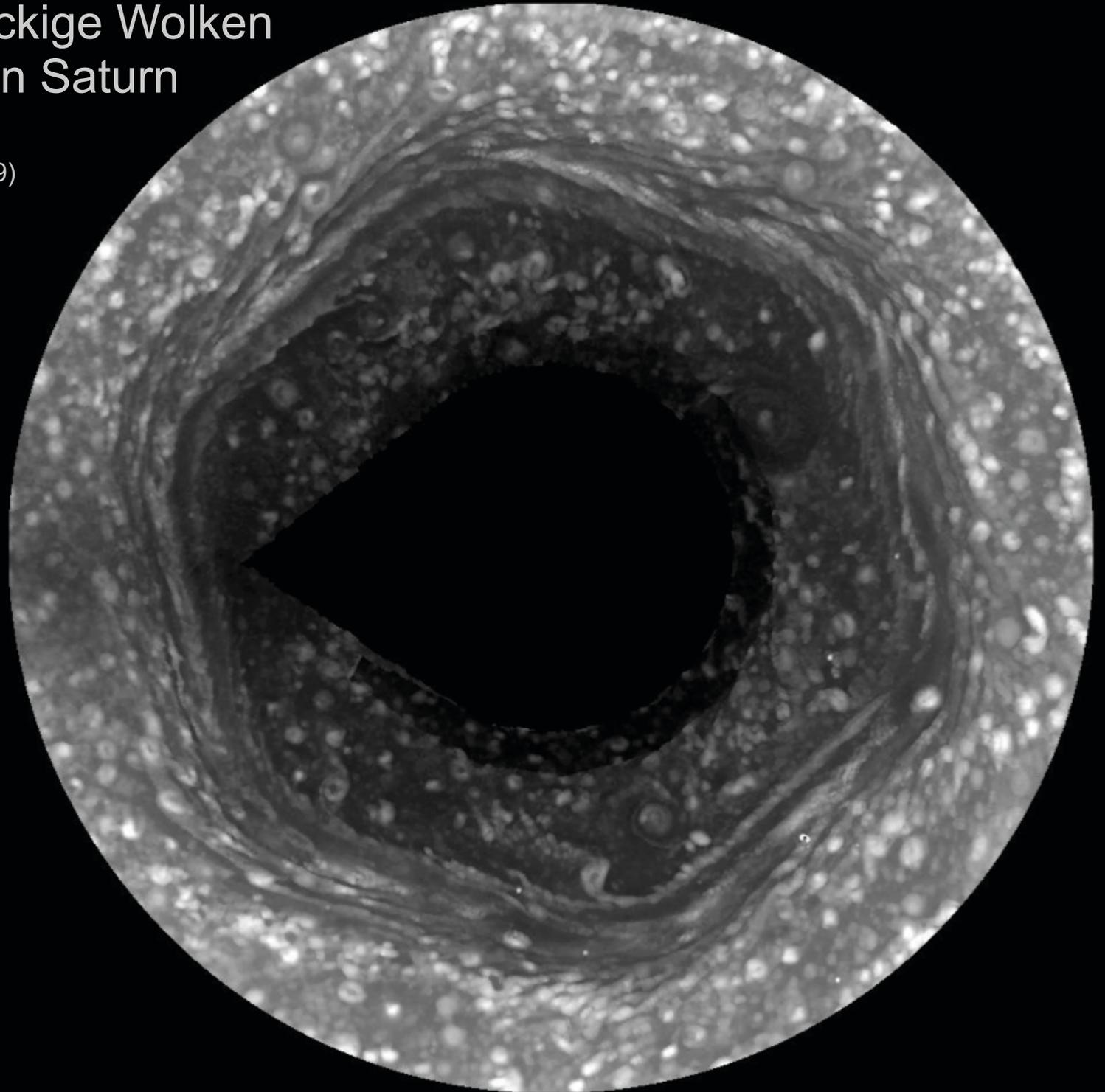




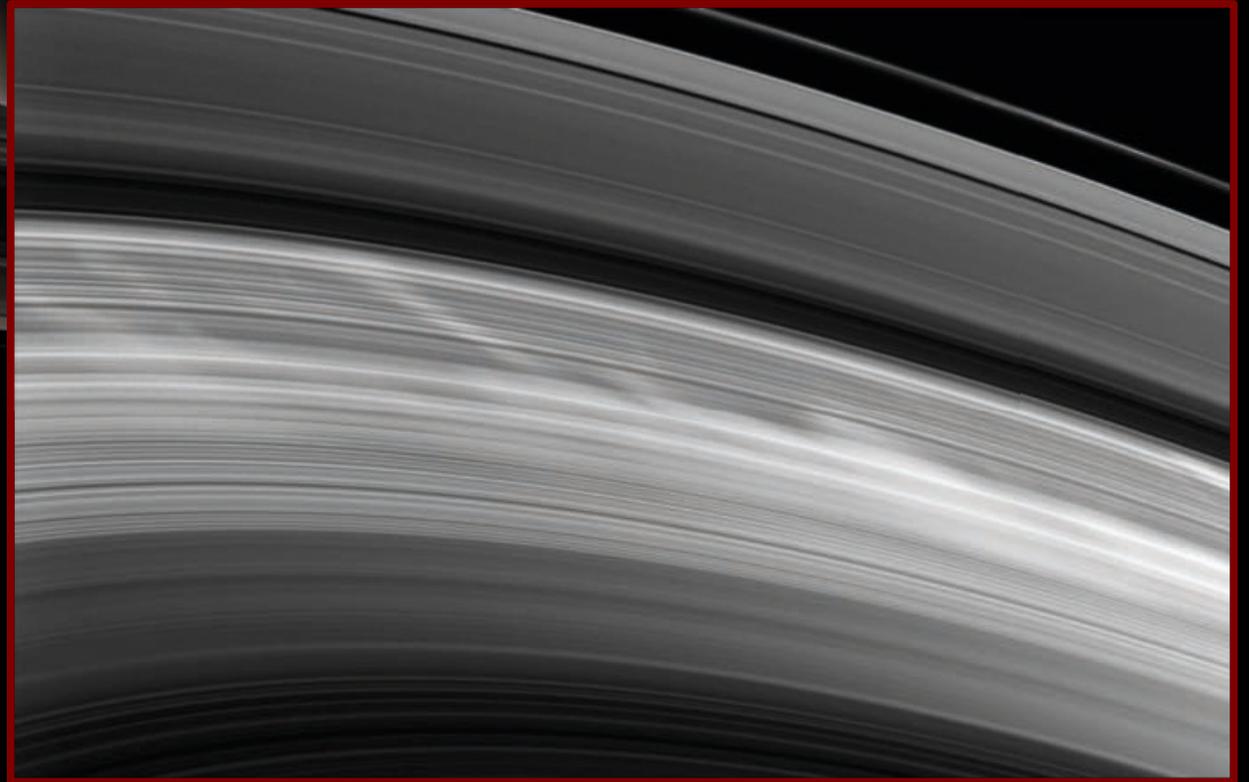
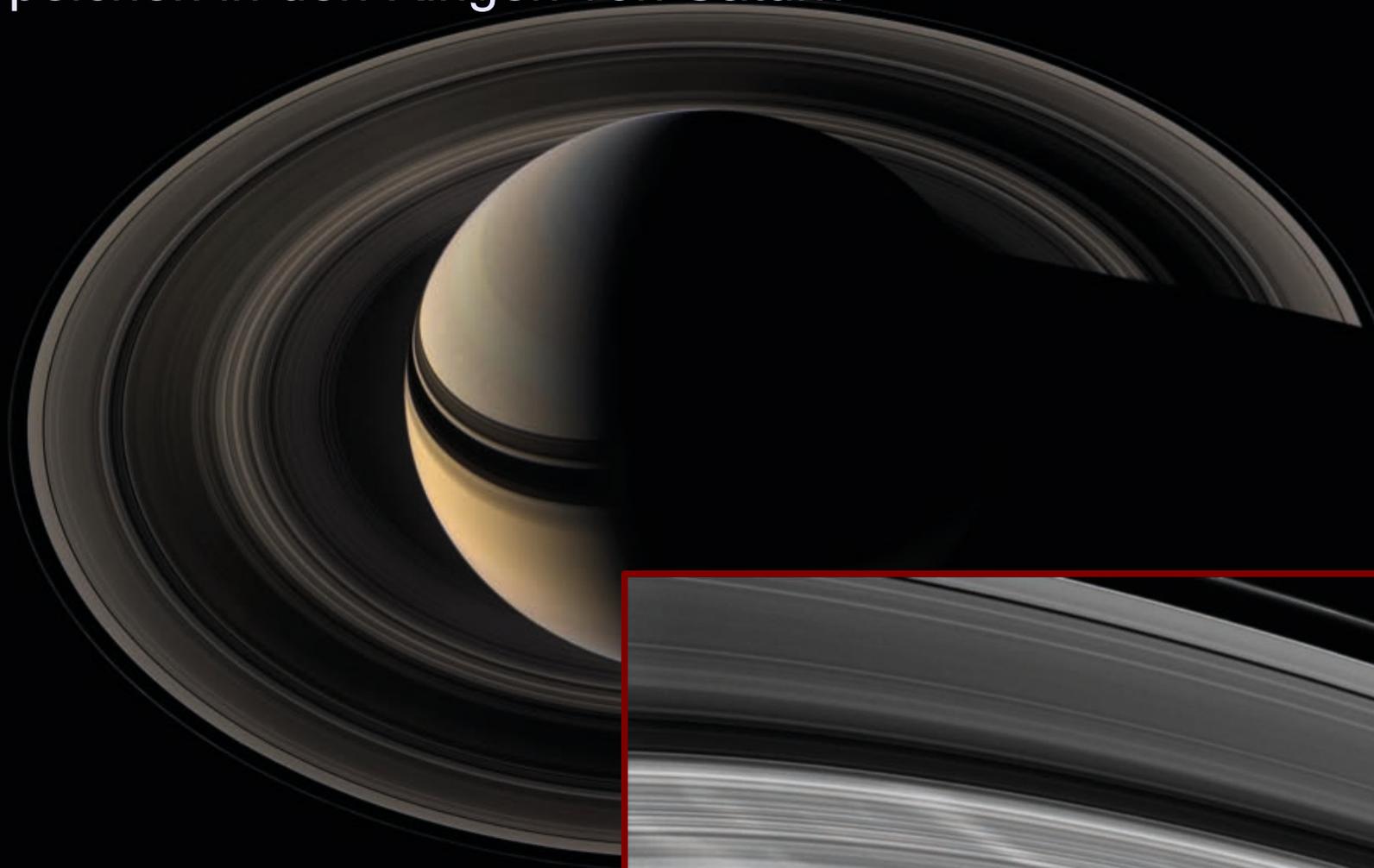
Schwedisches Sonnenteleskop (2002)

Mysteriöse sechseckige Wolken um den Nordpol von Saturn

Cassini Imaging Team, NASA (2009)



Speichen in den Ringen von Saturn



Cassini Imaging Team
(2007, 2009)



Die Milchstraße



Teleskope & Fernrohre

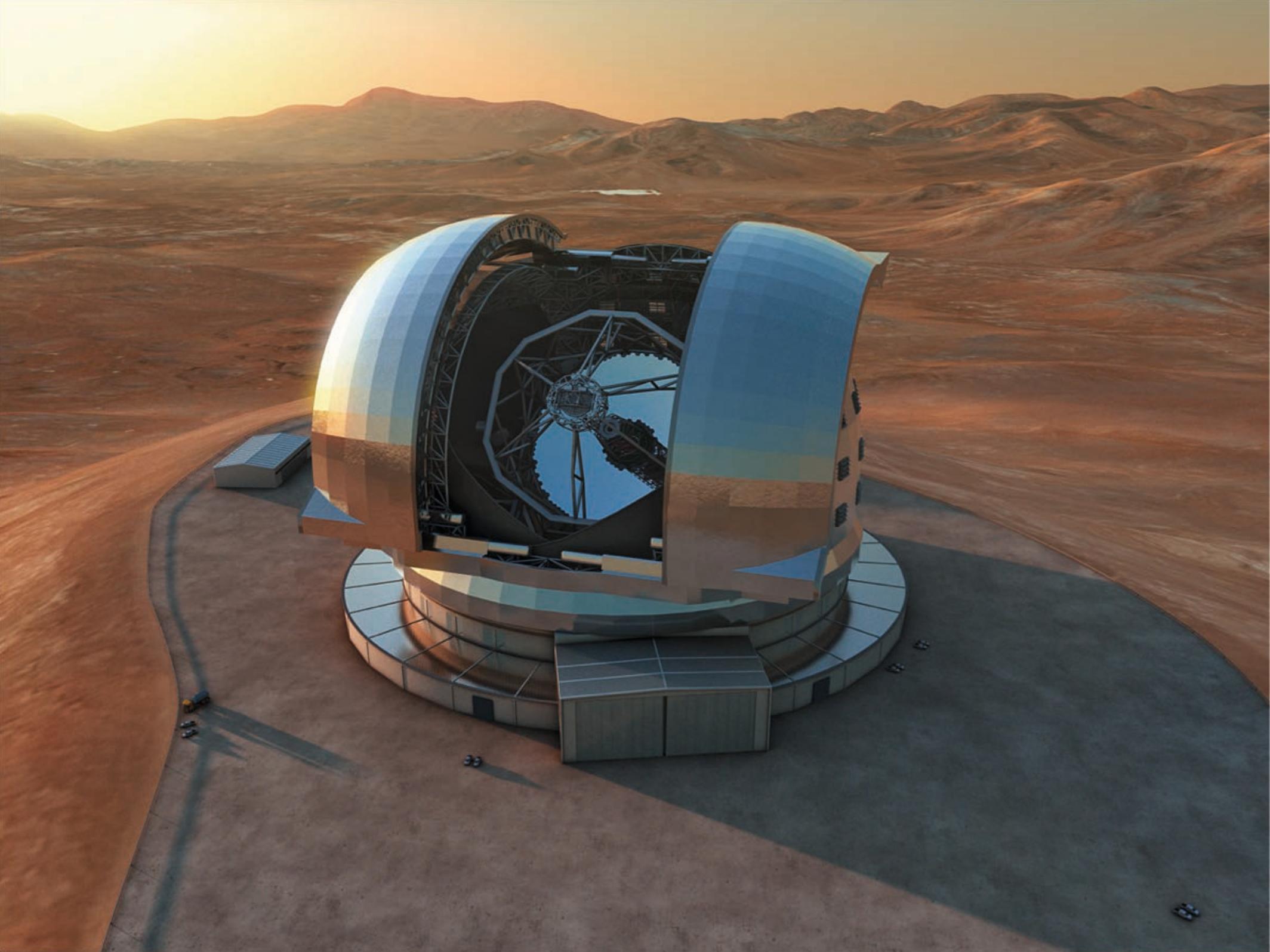


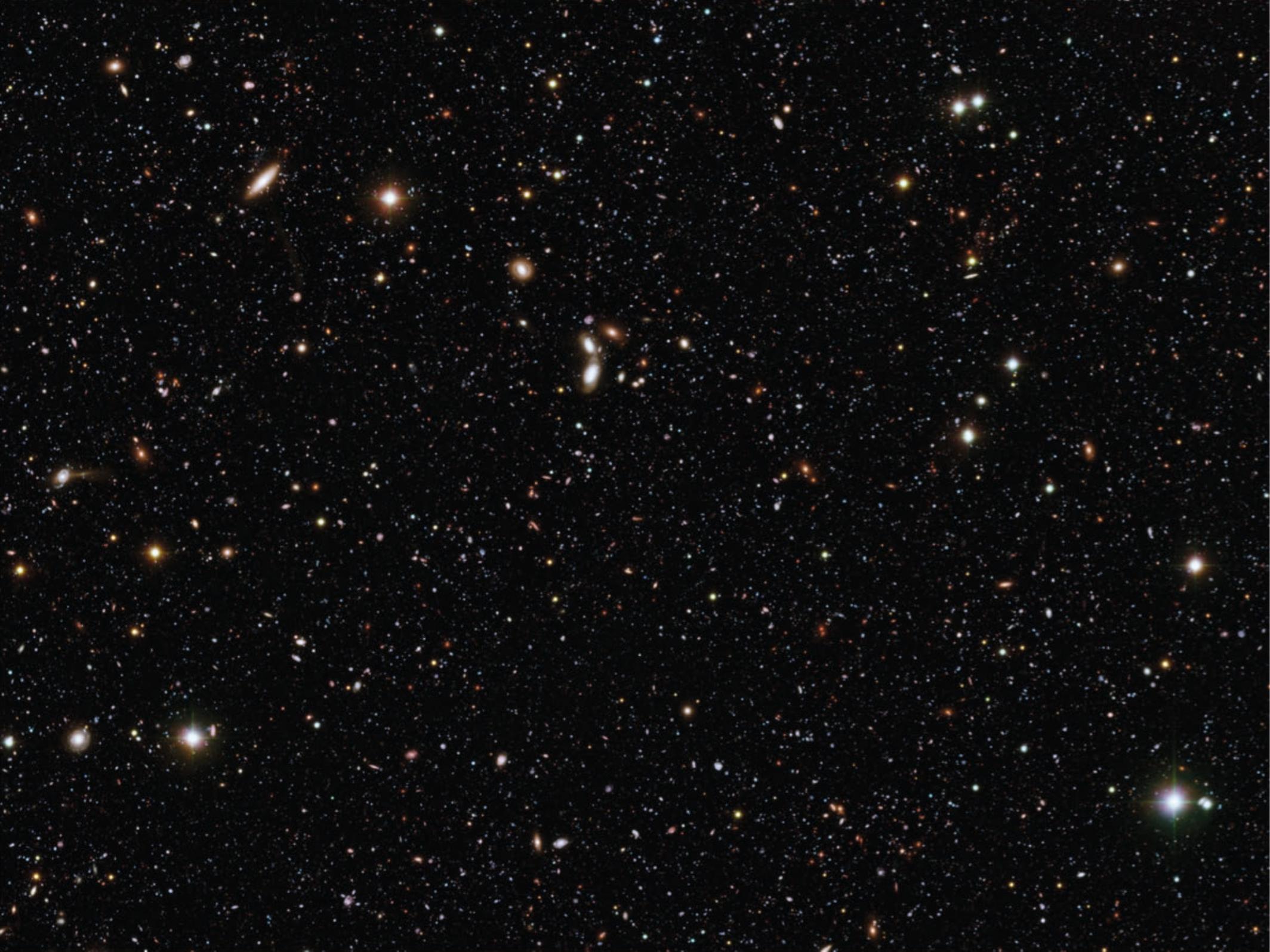




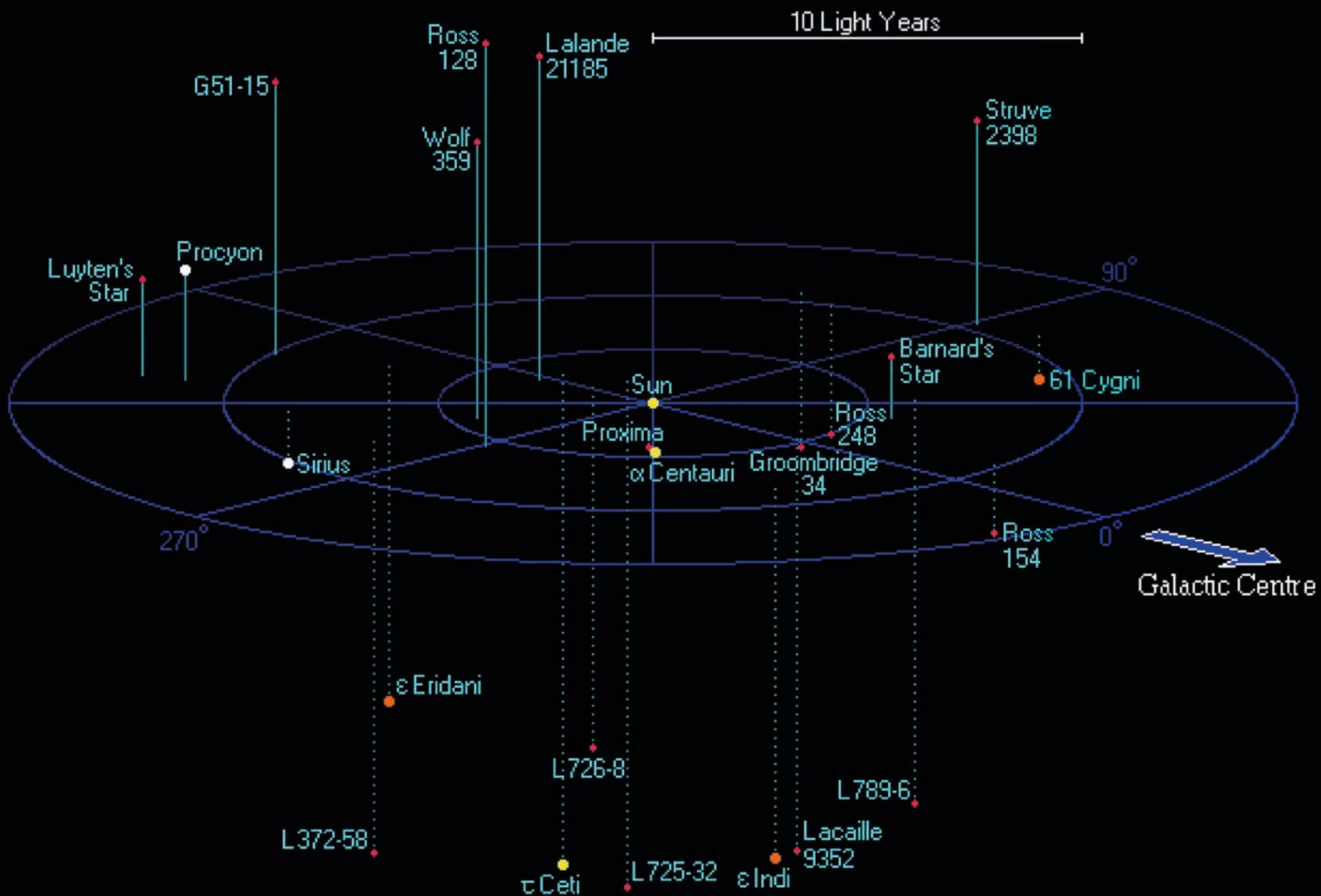




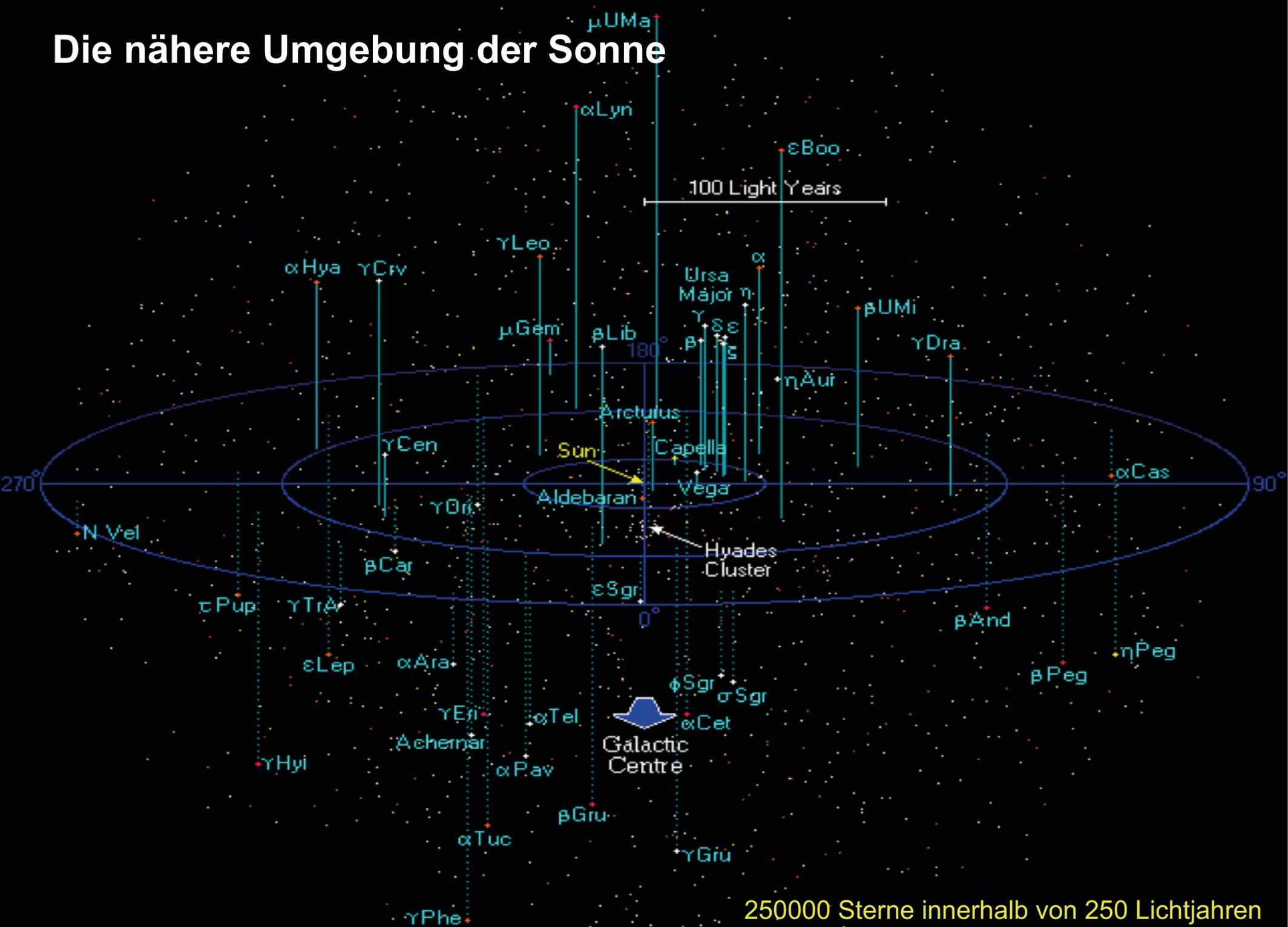




Die nächstgelegenen Sterne

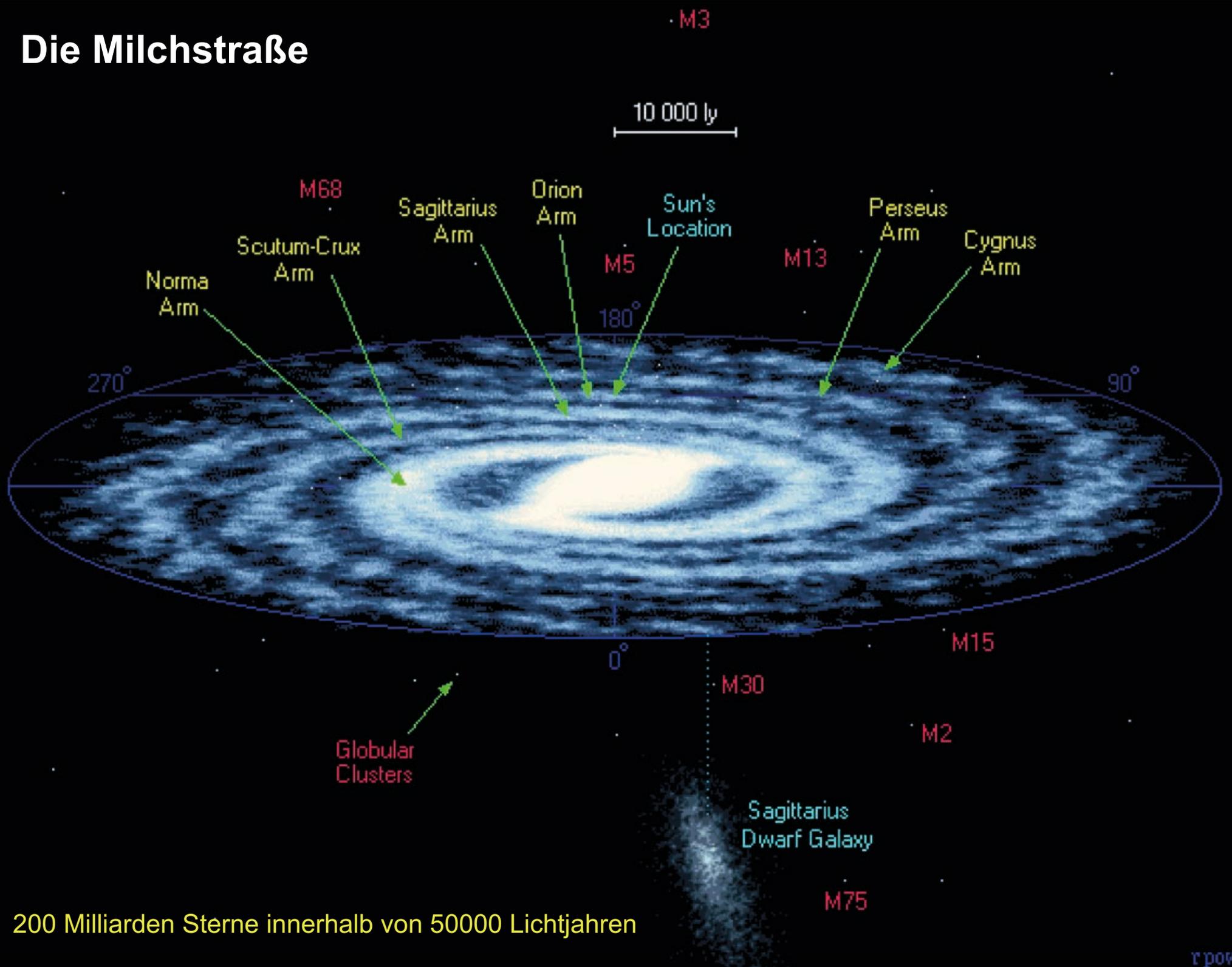


Die nähere Umgebung der Sonne

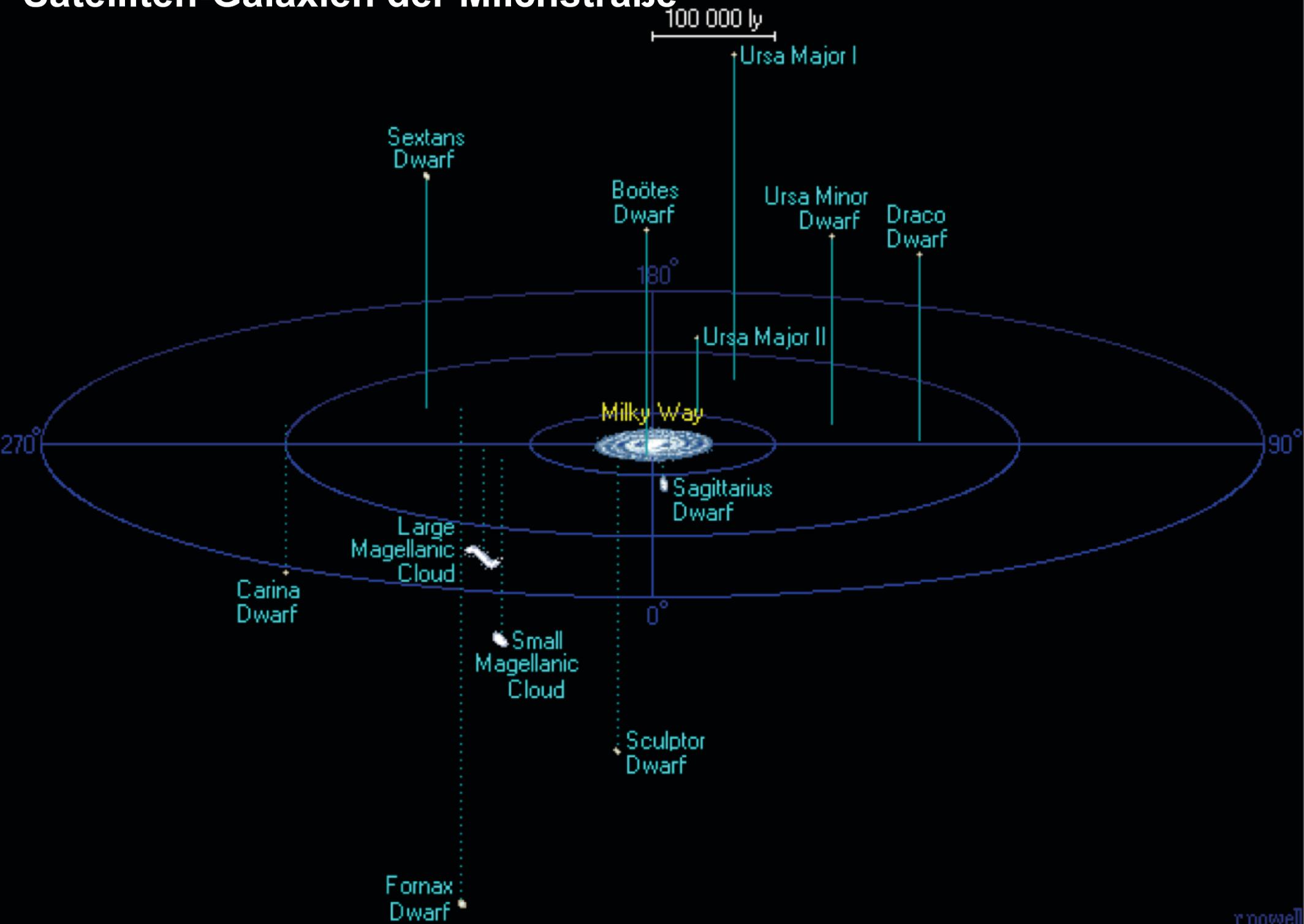


250000 Sterne innerhalb von 250 Lichtjahren

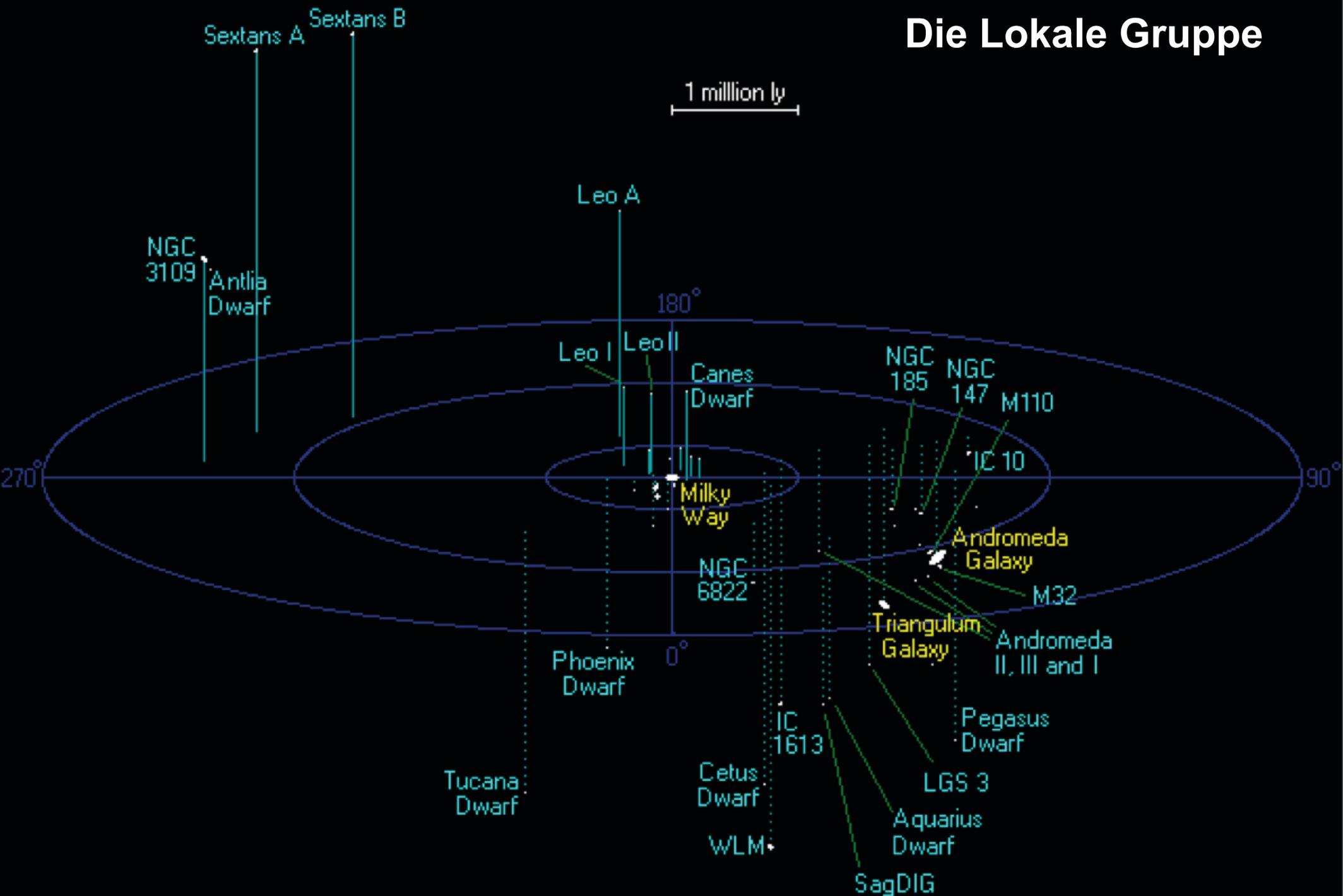
Die Milchstraße



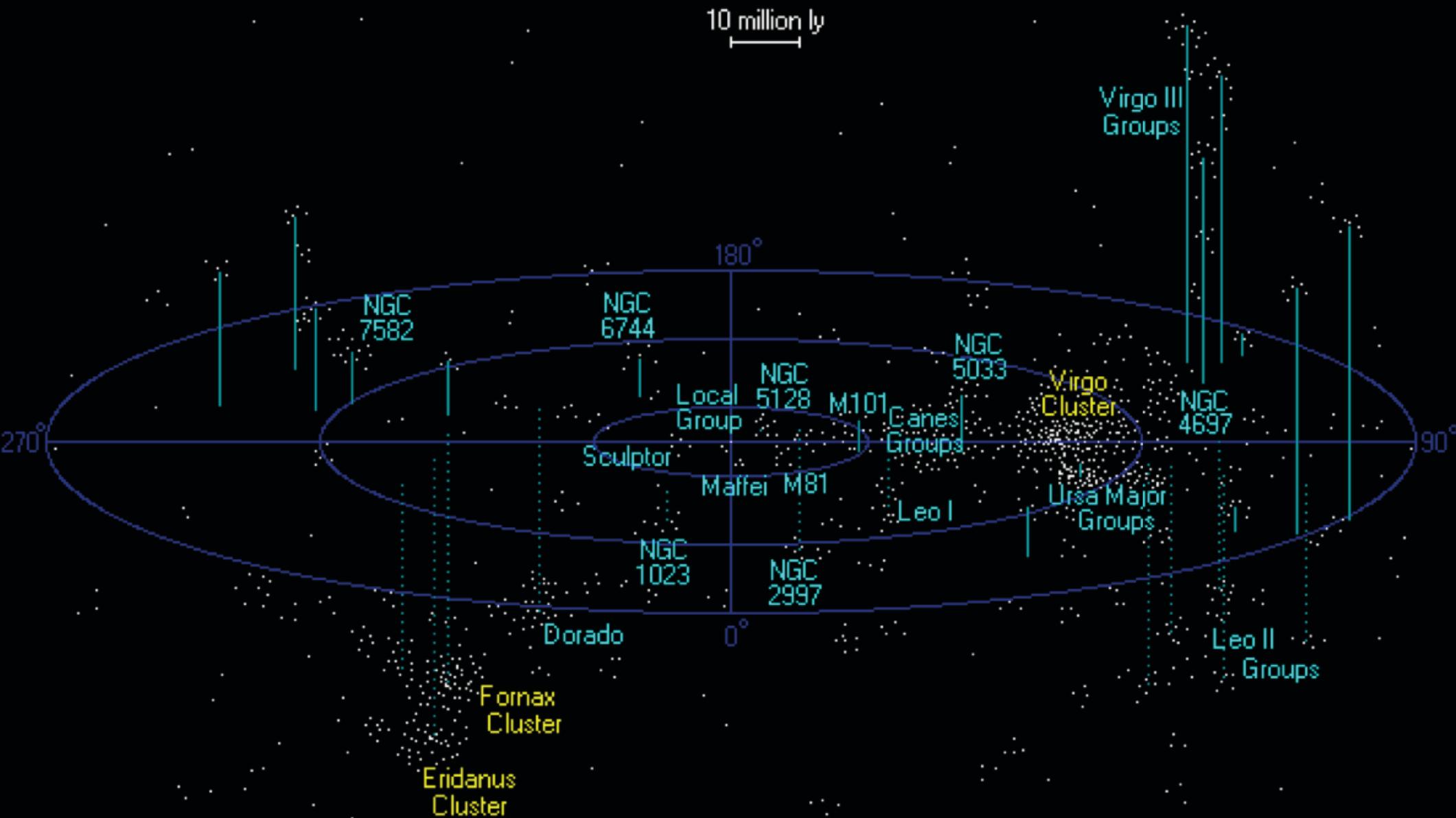
Satelliten-Galaxien der Milchstraße



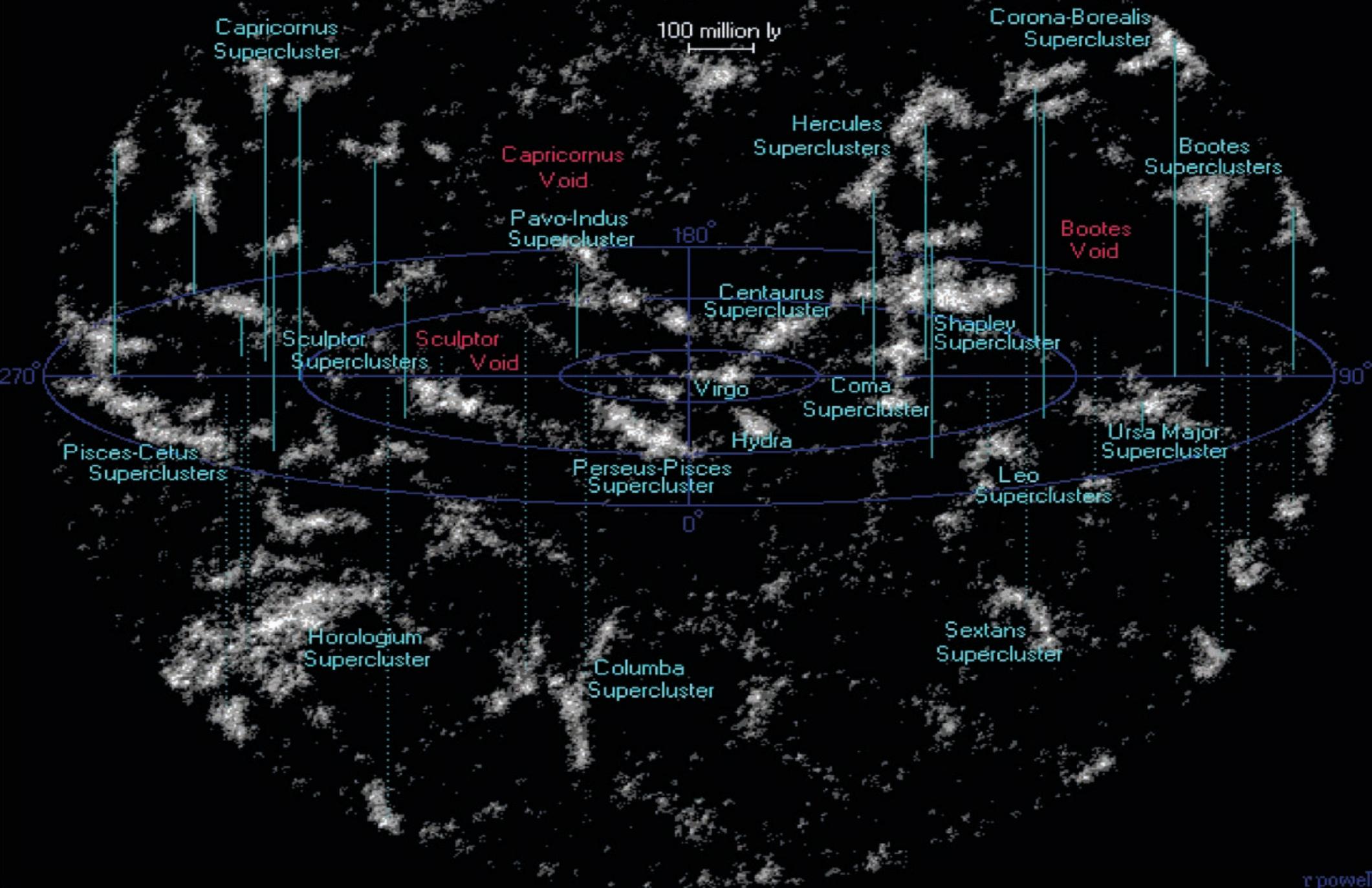
Die Lokale Gruppe



Der Virgo-Galaxienhaufen



Die nächstgelegenen Super-Galaxienhaufen



Das sichtbare Universum

1 billion ly

30 Milliarden Trillionen Sterne

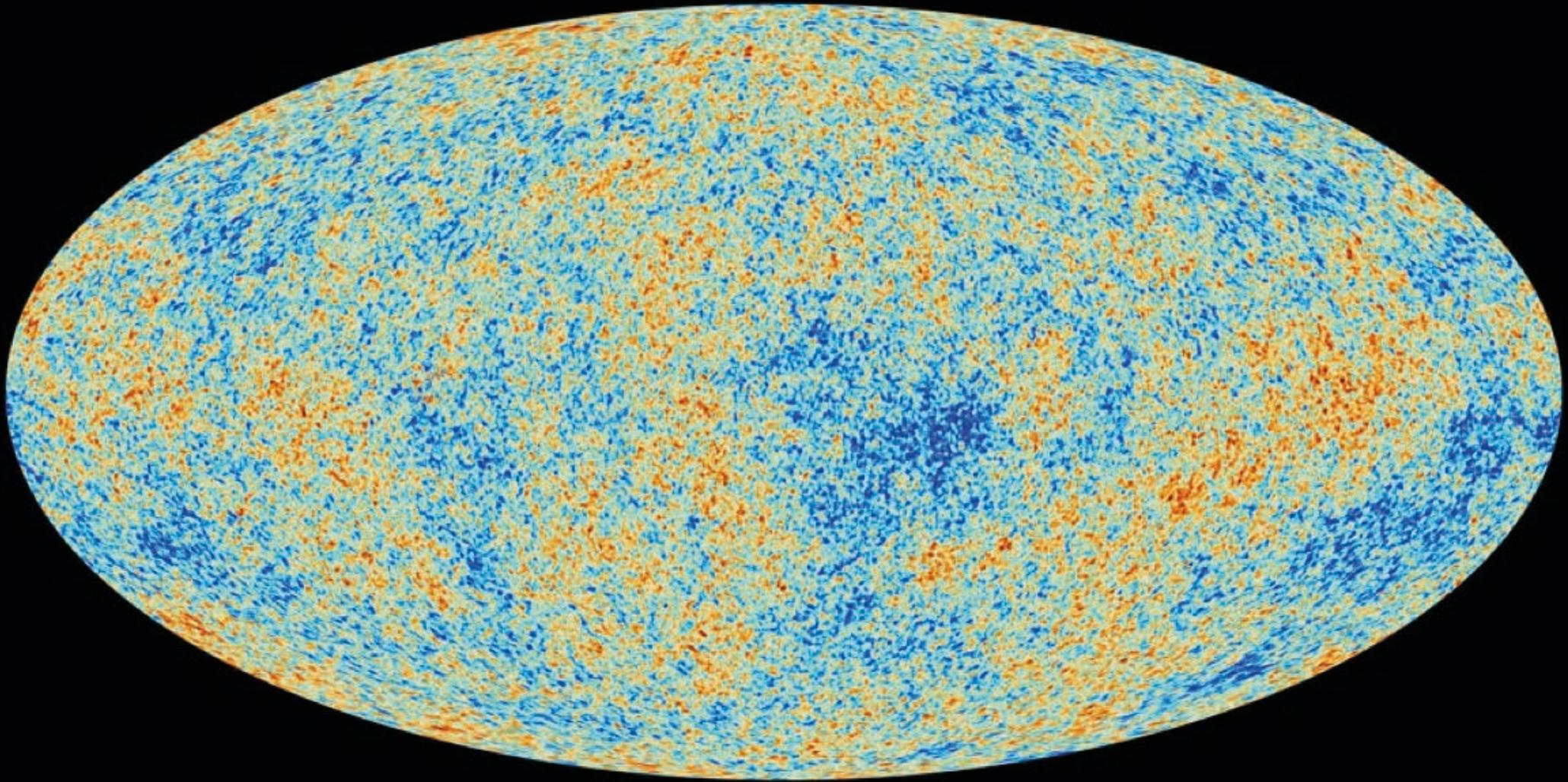
= 3×10^{22}

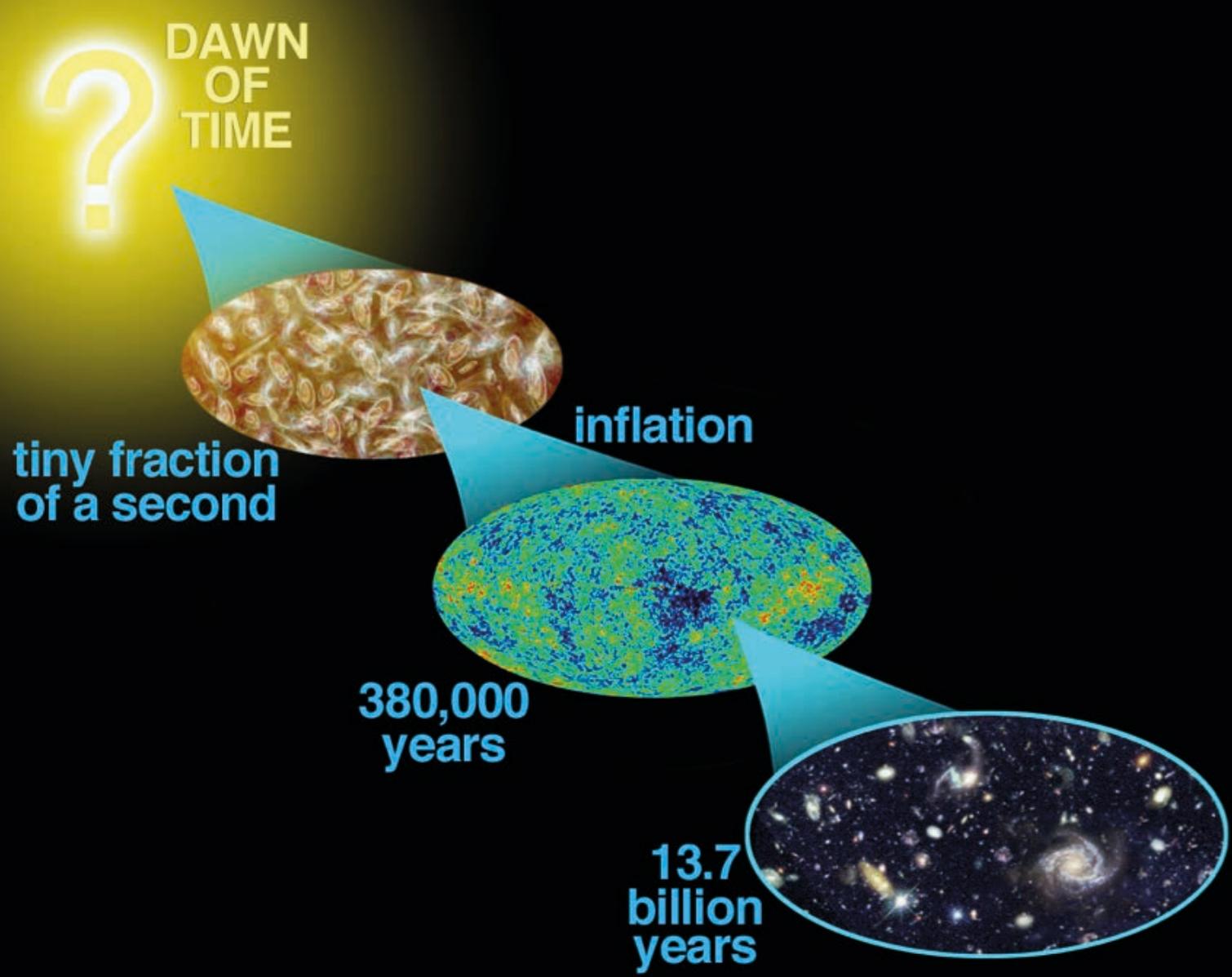
= 30 000 000 000 000 000 000 000 000

30 Milliarden Trillionen Sterne

Der Mikrowellenhintergrund ist die Restwärme des Urknalls

HIMMELSKARTE DER TEMPERATURSCHWANKUNGEN (PLANCK SATELLIT)

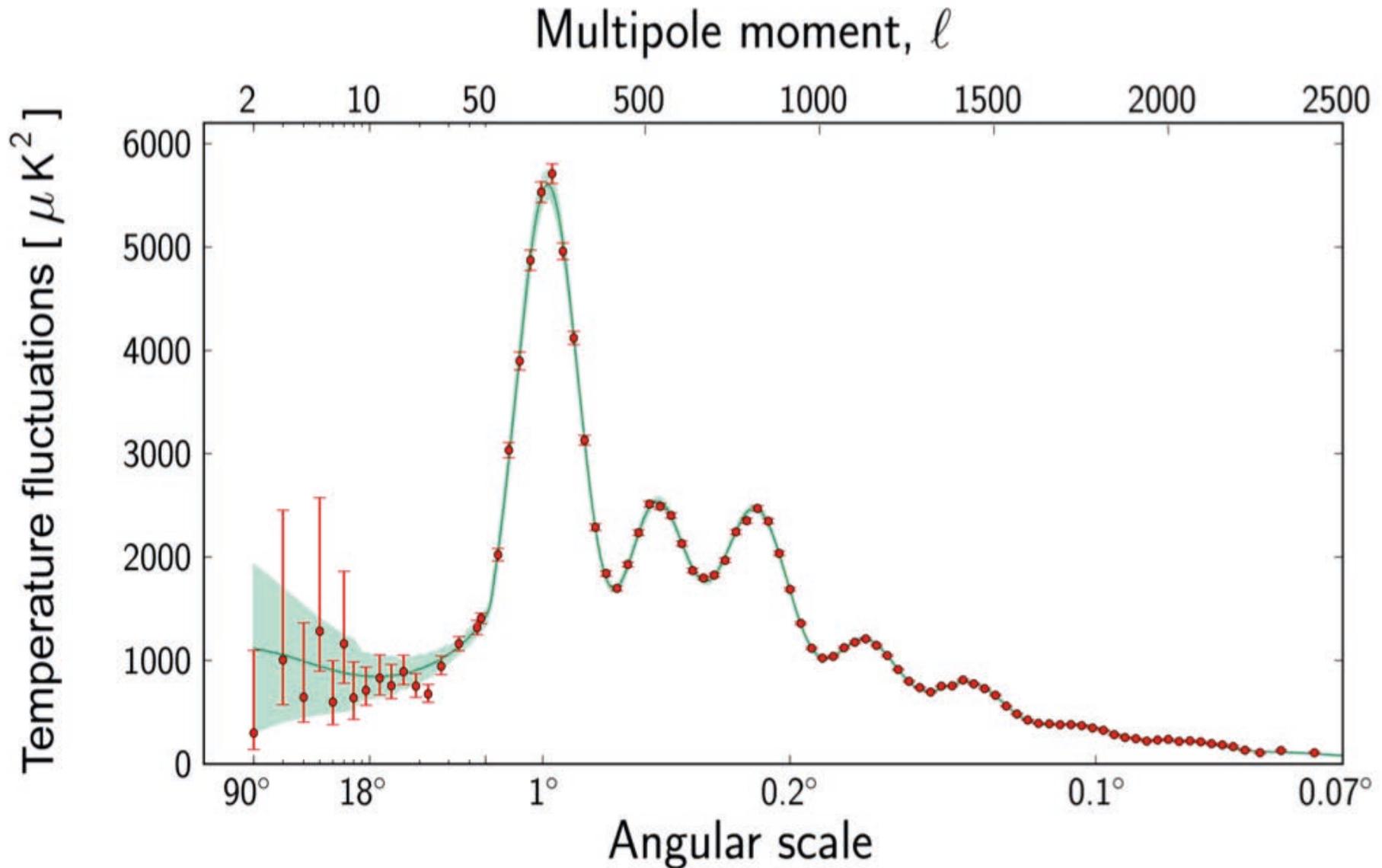




Jüngste Beobachtungsfortschritte legen wesentliche Parameter unseres Kosmos präzise fest

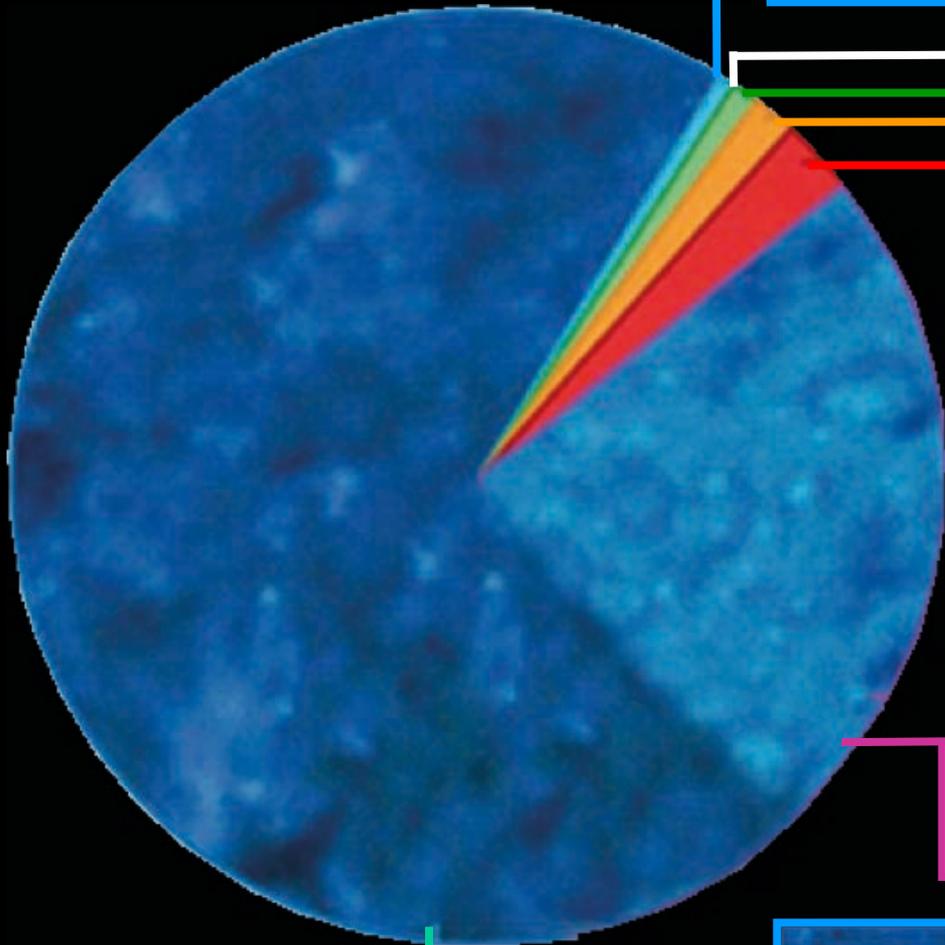
NEUE CMB DATEN DES PLANCK-SATELLITEN

Minimales, 6-parametriges Λ CDM Modell liefert eine hervorragende Beschreibung

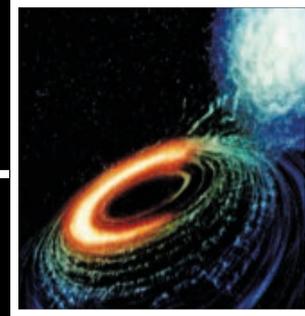


Planck Collaboration (2013)

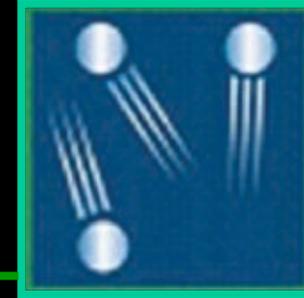
Die dunkle Seite des Universums



Schwere Elemente
0.03%



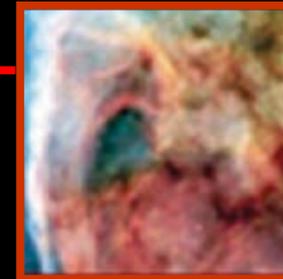
Schwarze Löcher
0.06%



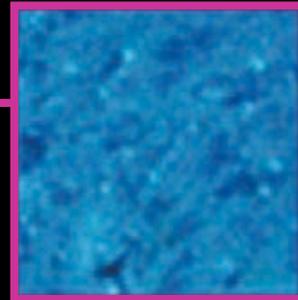
Neutrinos
0.3%



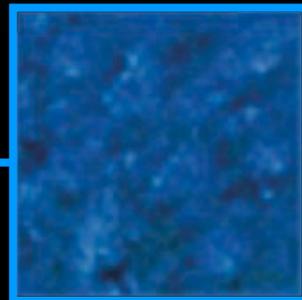
Sterne
0.5%



Freies Helium
und Wasserstoff
Gas 3%



Dunkle Materie 23%



Dunkle Energie 73%

THE BIG BANG

INFLATION

GALAXY EVOLUTION

CONTINUES...

DARK ENERGY ?

FIRST STARS
400,000,000 YEARS
AFTER BIG BANG

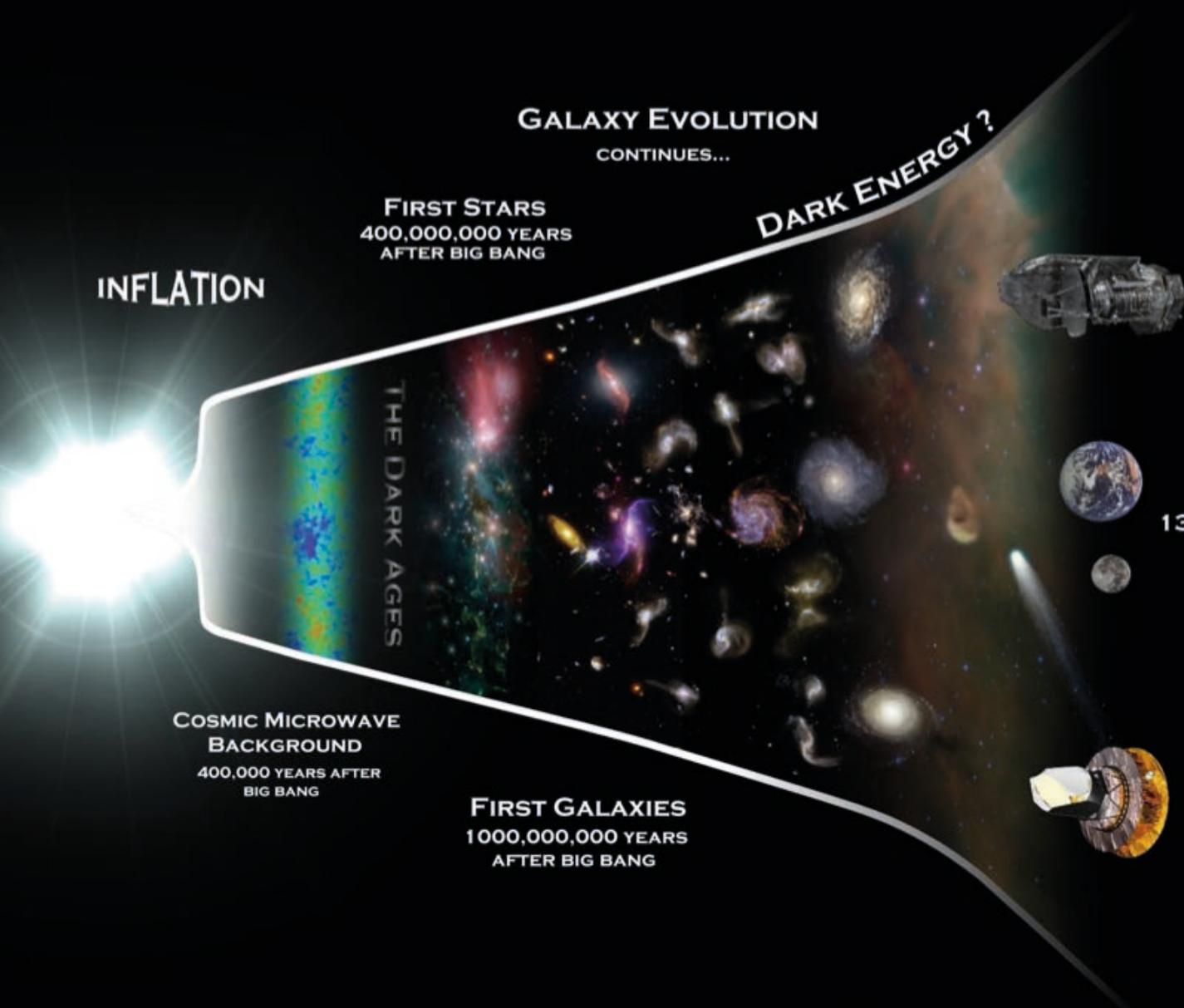
THE DARK AGES

COSMIC MICROWAVE
BACKGROUND
400,000 YEARS AFTER
BIG BANG

FIRST GALAXIES
1,000,000,000 YEARS
AFTER BIG BANG

FORMATION OF
THE SOLAR SYSTEM
8,700,000,000 YEARS
AFTER BIG BANG

Now
13,700,000,000 YEARS
AFTER BIG BANG



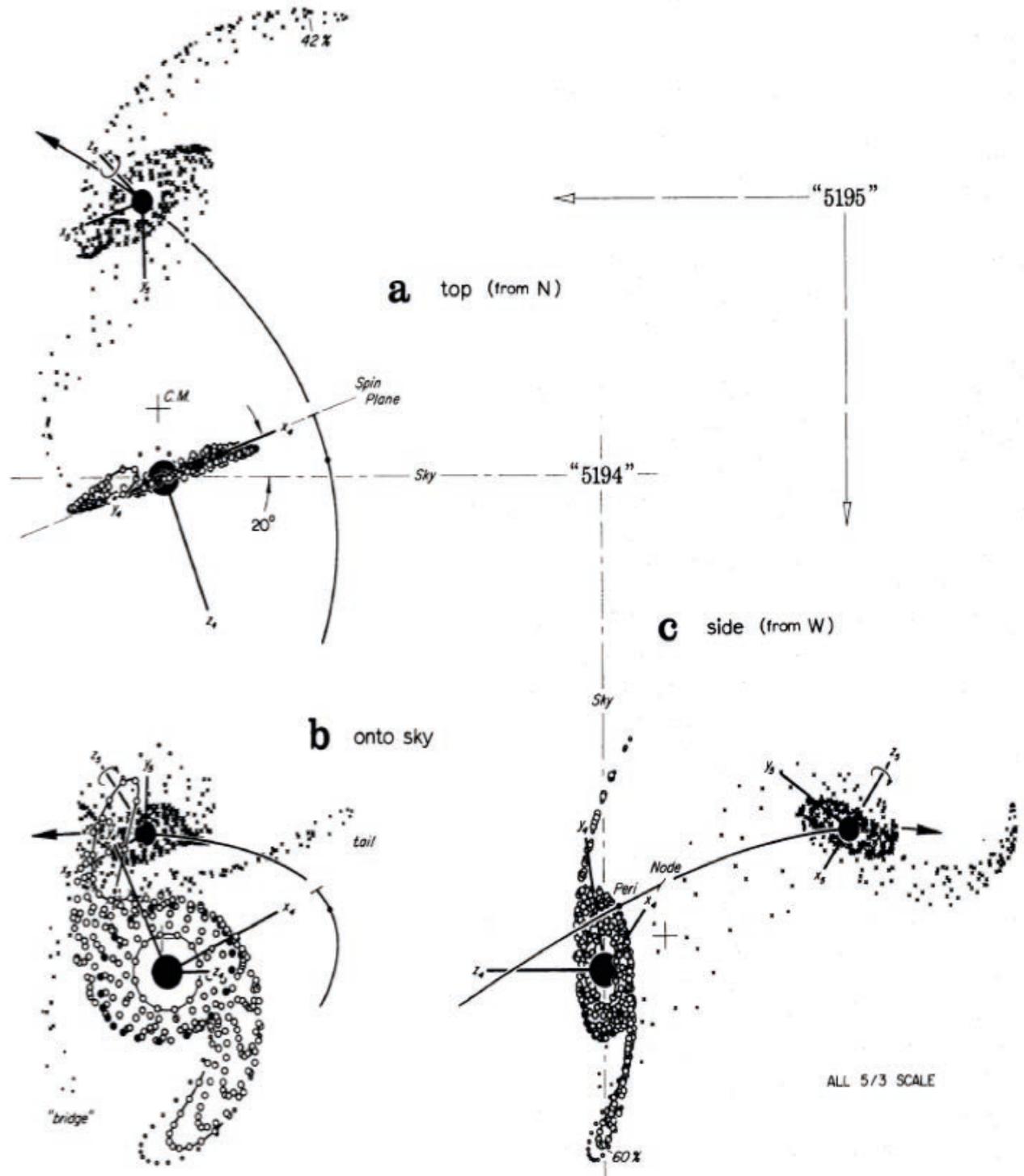
Hazel Hen in Stuttgart – ein paralleler Höchstleistungsrechner



7.4 PFlops

Die berühmte
“merger hypothesis”
 schlägt vor, dass
 seltsam verformte
 Galaxienpaare durch
 Galaxienkollisionen
 entstehen, die schließ-
 lich zu elliptischen
 Galaxien führen

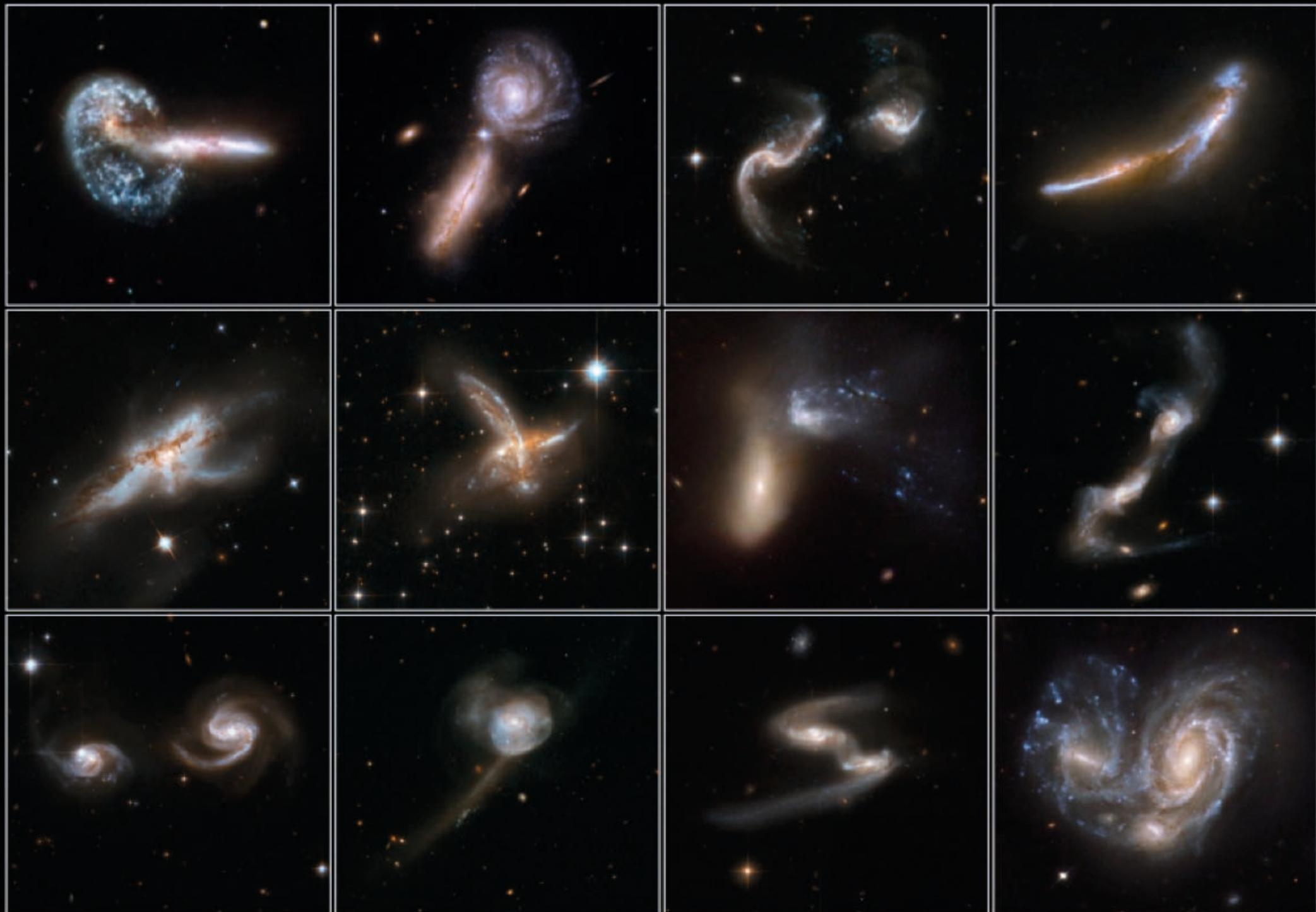
TOOMRE & TOOMRE (1972)



Ein Modell für die Wechselwirkung
 von M51 und NGC 5195

Interacting Galaxies

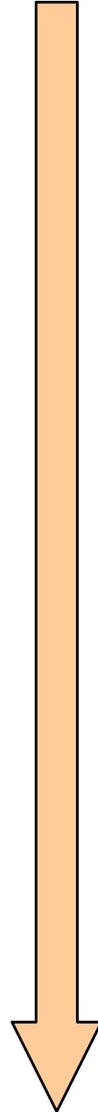
Hubble Space Telescope • ACS/WFC • WFPC2



Der Preis von 1 Gflop ist wie ein Stein gefallen

UNGEFÄHRE KOSTEN EINES COMPUTERS MIT EINER LEISTUNG VON 1 GFLOP

Ein Preisverfall von ~8 Größenordnungen über einen Zeitraum von 30 Jahren



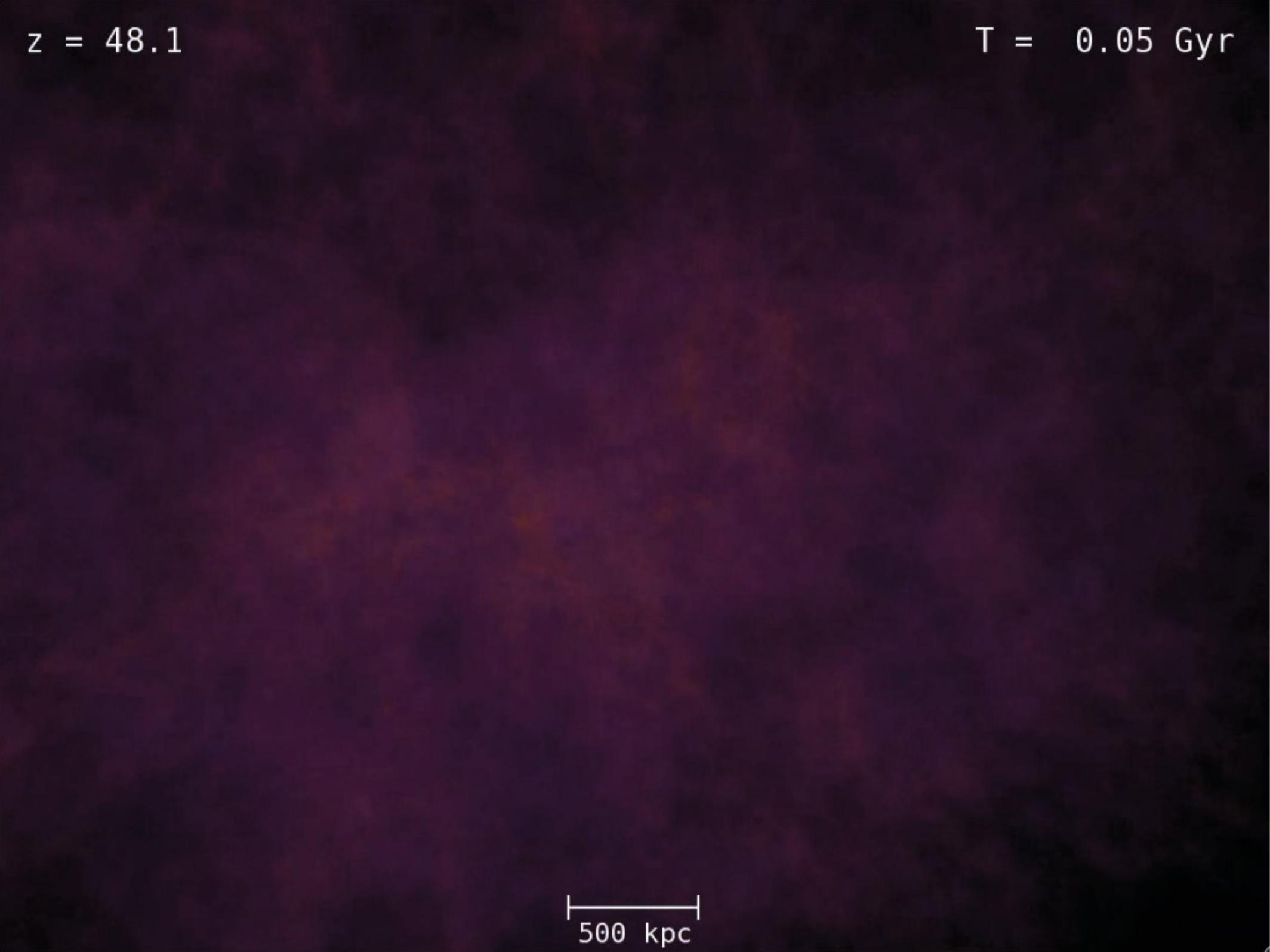
Quelle: Wikipedia

Date	Approximate cost per GFLOPS	Approximate cost per GFLOPS inflation adjusted to 2013 US dollars ^[45]	Platform providing the lowest cost per GFLOPS
1961	US \$1,100,000,000,000 (\$1.1 trillion)	US \$8.3 trillion	About 17 million IBM 1620 units costing \$64,000 each
1984	\$18,750,000	\$42,780,000	Cray X-MP/48
1997	\$30,000	\$42,000	Two 16-processor Beowulf clusters with Pentium Pro microprocessors ^[47]
April 2000	\$1,000	\$1,300	Bunyip Beowulf cluster
May 2000	\$640	\$836	KLAT2
August 2003	\$82	\$100	KASY0 ↗
August 2007	\$48	\$52	Microwulf ↗
March 2011	\$1.80	\$1.80	HPU4Science ↗
August 2012	\$0.75	\$0.73	Quad AMD7970 GHz System ↗
June 2013	\$0.22	\$0.22	Sony Playstation 4 ↗
November 2013	\$0.16	\$0.16	AMD Sempron 145 GeForce GTX 760 System ↗
December 2013	\$0.12	\$0.12	Pentium G550 R9 290 System ↗

$z = 48.1$

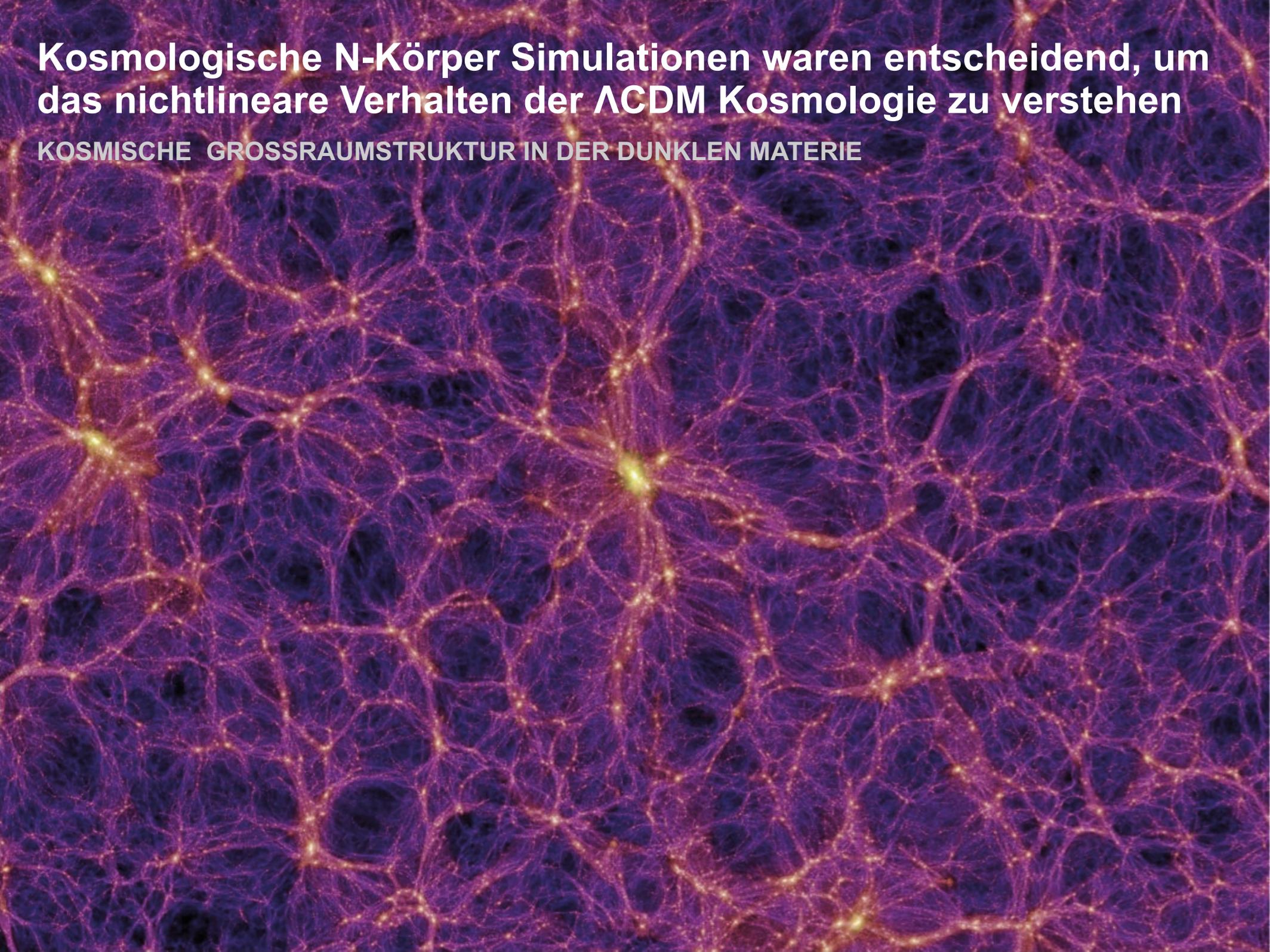
$T = 0.05 \text{ Gyr}$

500 kpc



**Kosmologische N-Körper Simulationen waren entscheidend, um
das nichtlineare Verhalten der Λ CDM Kosmologie zu verstehen**

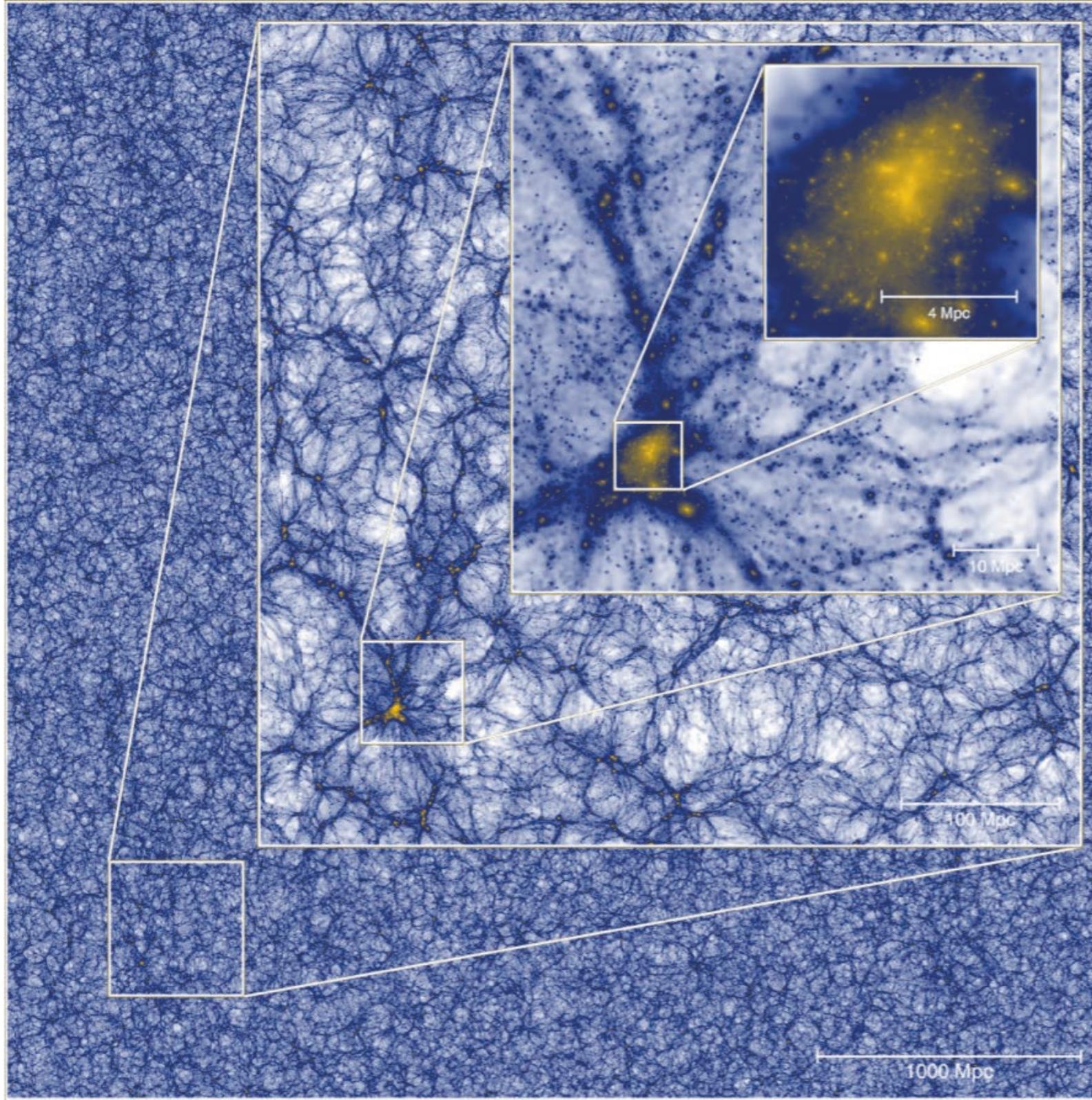
KOSMISCHE GROSSRAUMSTRUKTUR IN DER DUNKLEN MATERIE



Millennium-XXL

303 Milliarden
Teilchen

Die größte hoch
aufgelöste N-Teilchen
Simulation



Angulo, Springel,
White et al. (2011)

Das Ergebnis der Millennium Simulation ist eine Liste mit **60 Milliarden Zahlen***

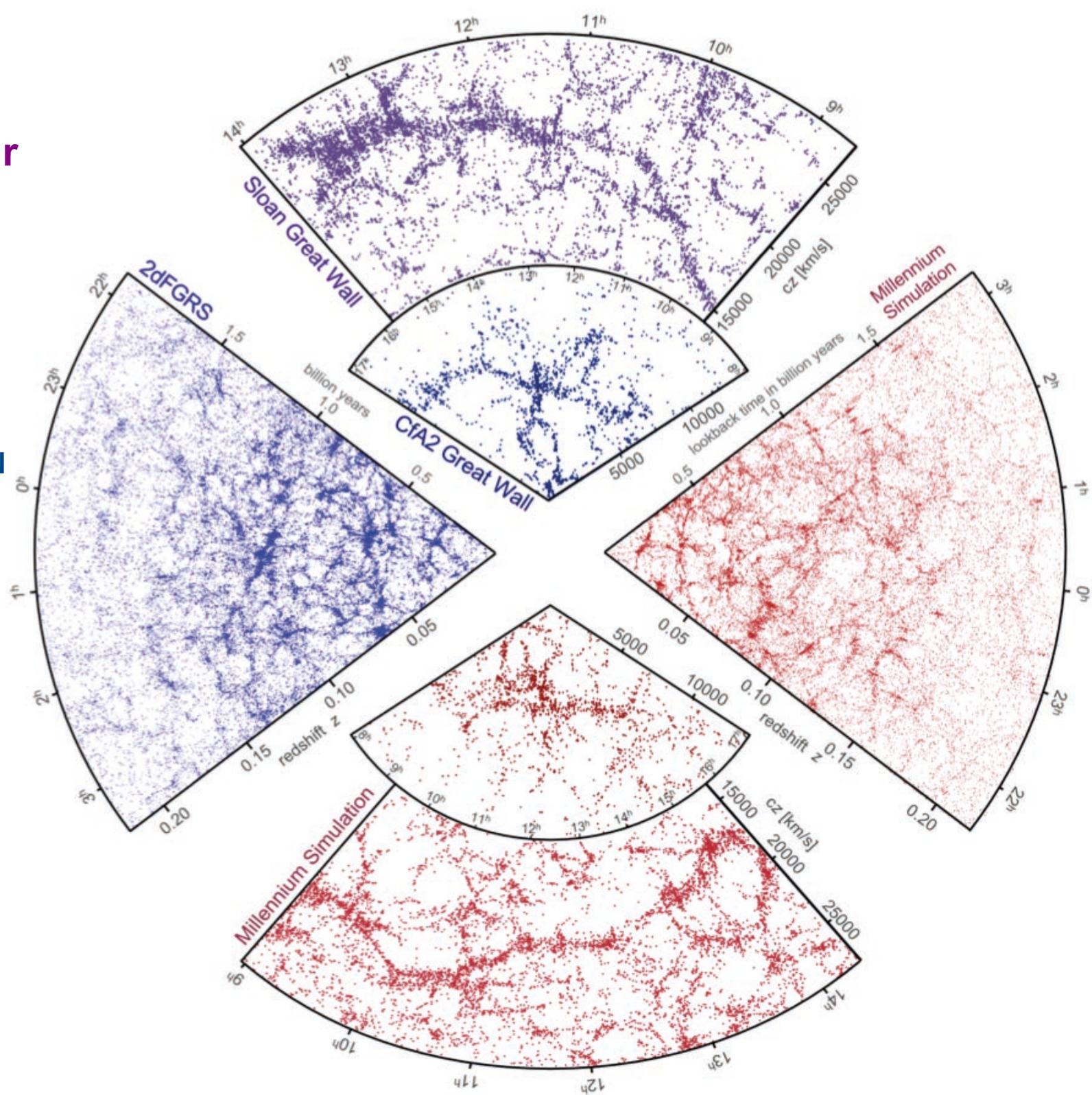
PHASENRAUM KOORDINATEN DER TEILCHEN

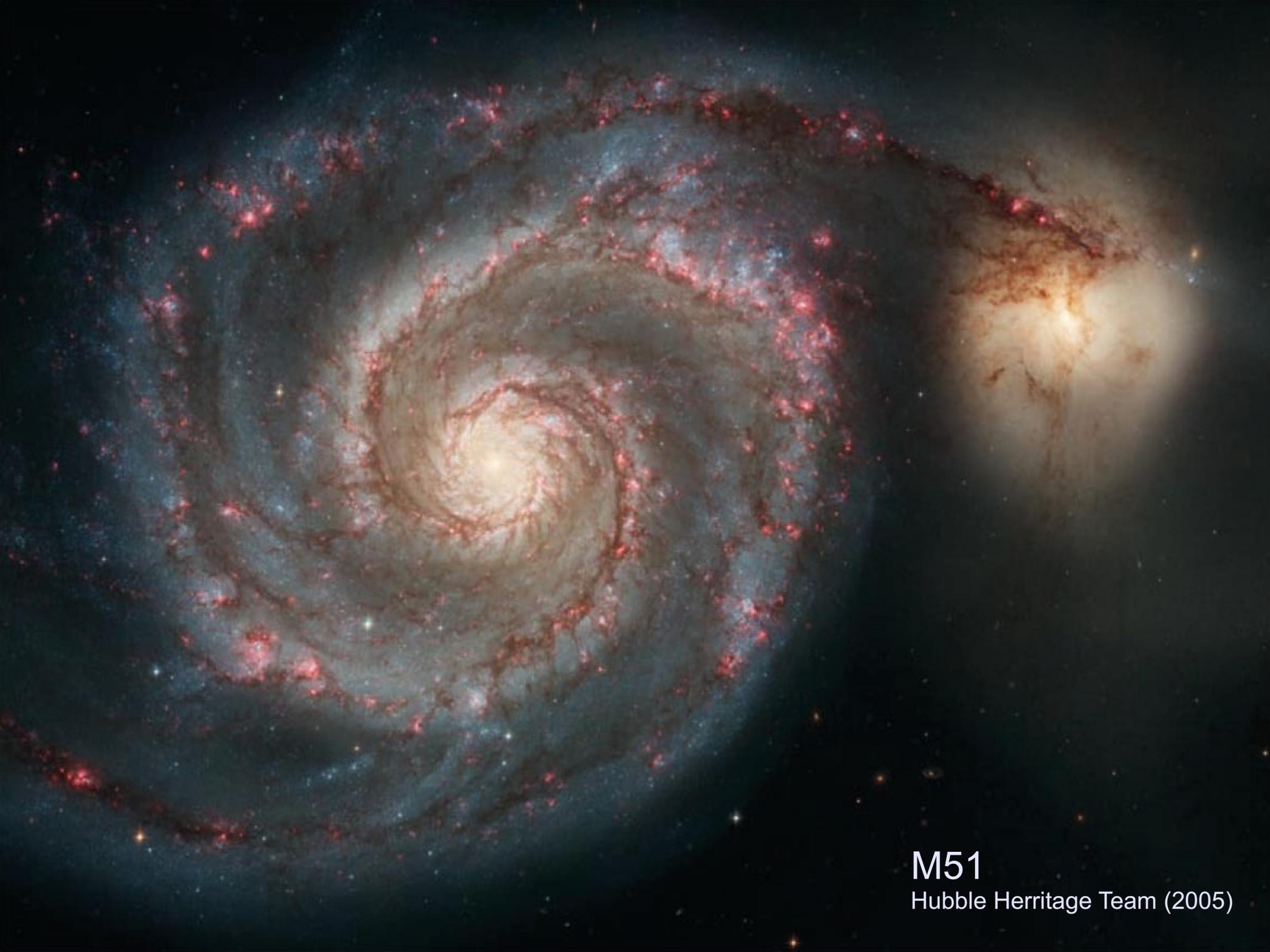
X	y	Z	V _x	V _y	V _z
314.26001	745.66888	370.33121	-90.20119	191.14938	103.75156
316.67566	766.89337	362.99713	-78.50227	187.55118	51.47593
323.45554	766.38782	344.29709	-63.31614	147.65451	78.05016
313.64520	752.02820	348.20020	-89.03946	147.13419	76.22576
296.03027	745.56812	334.73807	-77.72677	96.25417	87.05463
290.93192	755.60986	350.05496	-102.92673	118.71049	92.43941
281.19543	745.58704	363.56528	-81.56818	155.04465	97.96482
297.71011	759.31812	368.87430	-87.05585	192.59505	81.85943
285.16946	792.66412	377.99277	-105.20398	113.88999	76.50848
286.74234	783.26965	360.67300	-103.60987	121.45312	39.74818
299.97577	774.99866	350.17529	-104.64594	150.62953	37.11148
313.52136	787.29974	337.13708	-116.18470	174.52040	47.26388
304.98846	780.20728	374.62415	-99.49813	174.82487	103.35987
310.32690	791.92212	359.61008	-45.50785	97.64784	95.24279
325.51627	783.05096	373.09677	-69.54211	152.53419	81.62325
322.07971	801.04816	355.36896	-133.34152	151.29596	45.49487
299.65182	807.33673	343.39481	-35.34487	189.76573	121.31456
281.29971	799.37878	344.45026	-26.50418	177.28539	105.39162
290.92722	804.99182	362.11600	-58.94661	121.28194	120.26212
286.76523	805.98090	395.23892	-80.53864	184.44394	24.65293
302.14725	806.95367	381.78494	-59.48125	126.65170	70.45384
307.48138	808.63574	403.45633	-93.62634	145.24239	102.83086
322.93564	804.03632	382.25168	-68.81689	182.46657	136.57527
312.01071	788.37988	393.36658	-92.19463	146.87720	92.00867
312.76831	769.31189	397.57068	-73.25355	189.18690	151.66502
293.00305	774.34839	389.17767	-108.24481	146.13806	97.53626
281.13699	774.25256	412.70383	-129.07332	146.89197	136.00351
294.05652	787.52570	407.09238	-125.62066	186.51022	42.19235

* alle Ausgabedaten zusammen umfassen **~5000 Milliarden Zahlen**

Simulierte und beobachtete Großraumstruktur in der Galaxienverteilung stimmen gut überein

VIRTUELLE HIMMELSDURCHMUSTERUNGEN VERGlichen MIT DEN SDSS, 2DFGRS UND CFA-2 DATEN



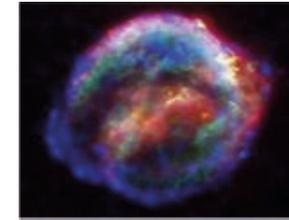


M51

Hubble Heritage Team (2005)

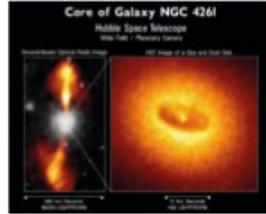
Welche Physik ist für die Regulierung verantwortlich?

- Supernova Explosionen (Energie & Impuls Input)



Kepler's
Supernova

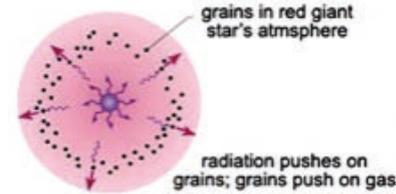
- Stellare Winde



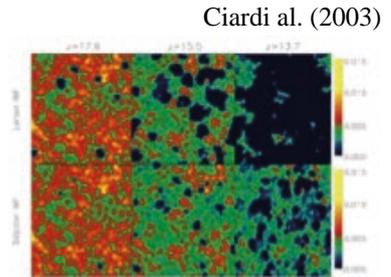
Bubble Nebula

- AGN Aktivität

- Strahlungsdruck auf Staub

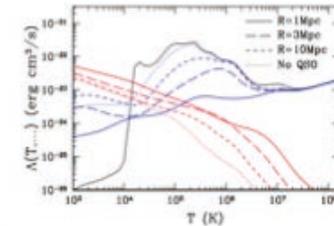


- Photoionisierender ultravioletter Hintergrund



- Änderung der Kühlung durch UV/Röntgen-Fluß

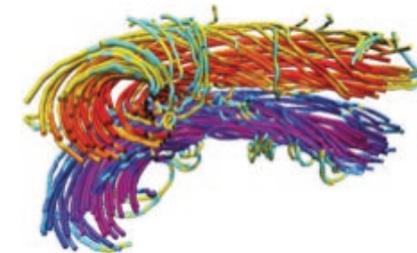
Gneding & Hollon (2012)



- Photoelektrisches Heizen



- Kosmische Strahlen (CR)

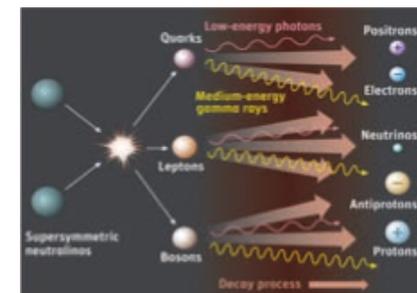


- Magnetischer Druck und MHD Turbulenz

- Heizen des Gases durch TeV-Blazare



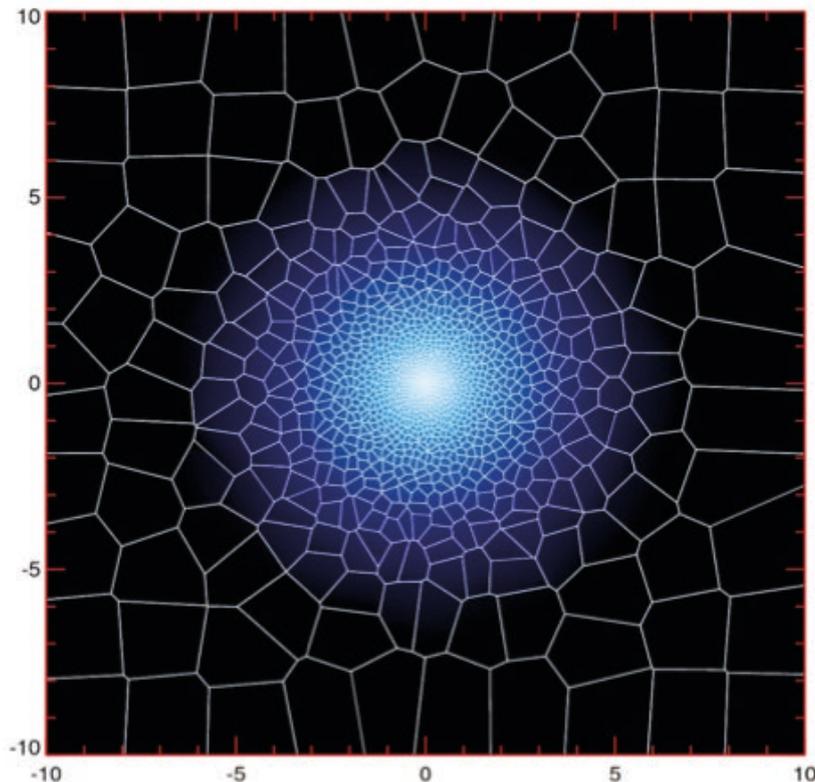
- Exotische Physik (z.B. zerfallende Dunkle Materie)



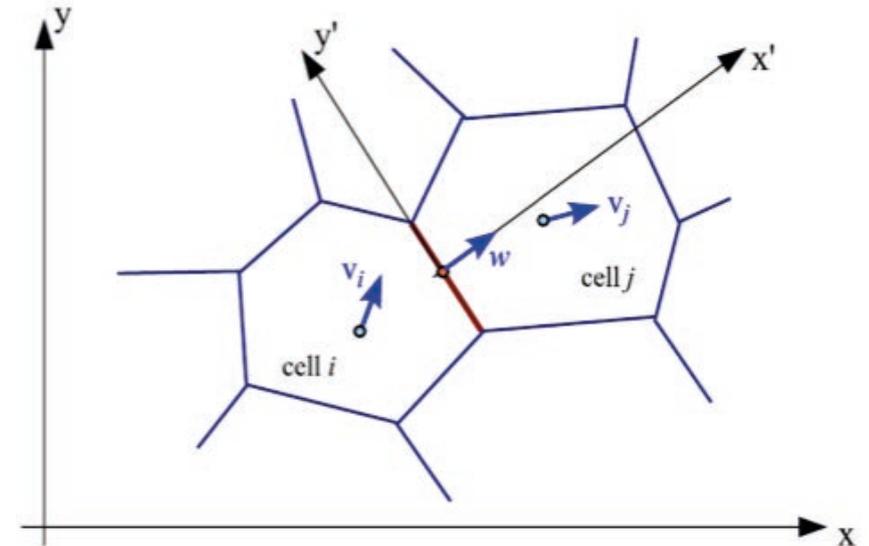
Der bewegte Gittercode AREPO ist besonders gut an die Anforderungen der Kosmologie angepasst

PRINZIPIELLE VORTEILE

- Low numerical viscosity, very low advection errors
- Full adaptivity and manifest Galilean invariance
- Makes larger timesteps possible in supersonic flows
- Crucial accuracy improvement over SPH technique



Skizze der Flußberechnung



The motion of the mesh generators uniquely determines the motion of all cell boundaries

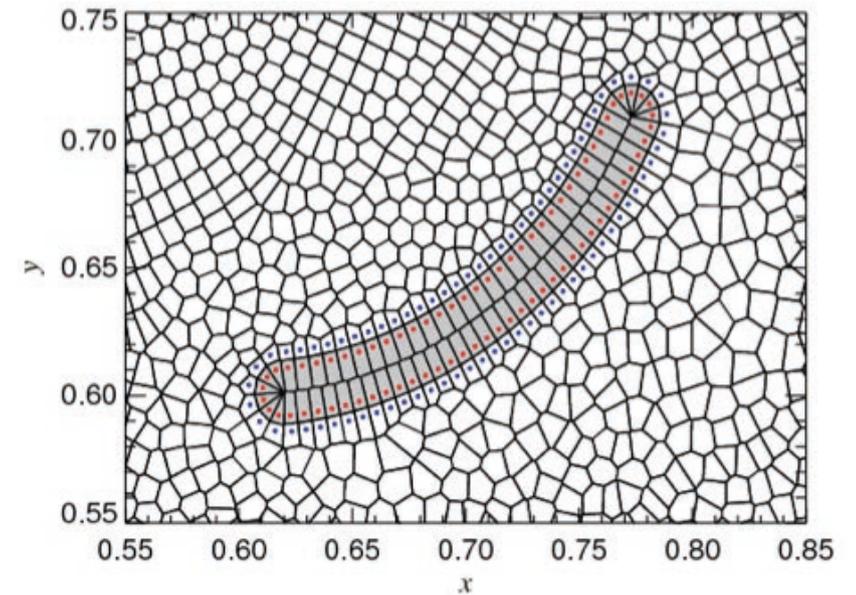
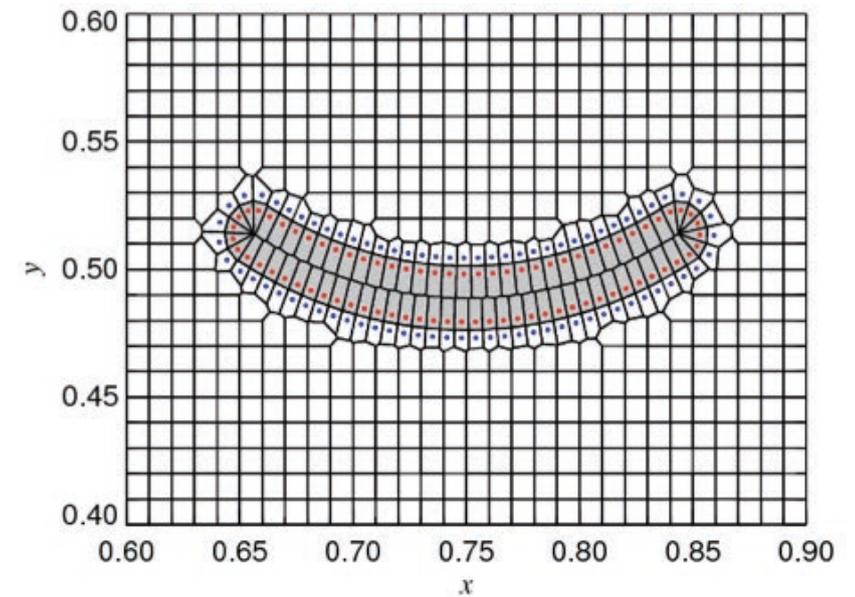
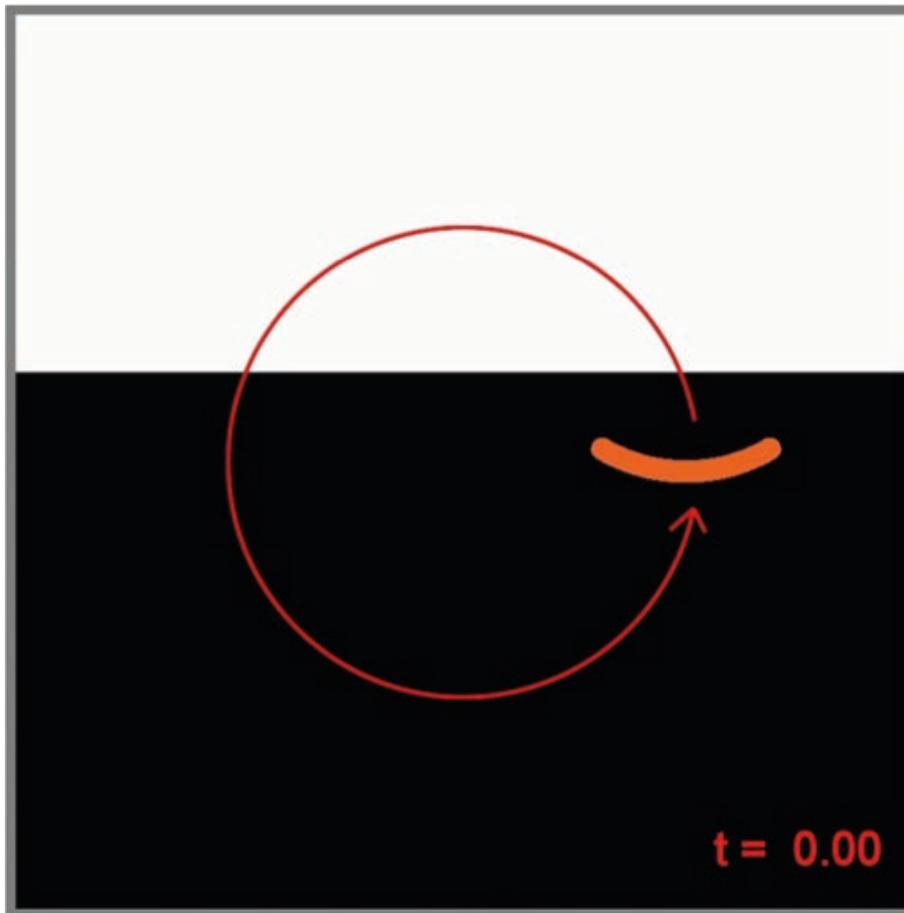
State left of cell face State right of cell face

$$\begin{pmatrix} \rho_L \\ v_L \\ P_L \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} \rho_R \\ v_R \\ P_R \end{pmatrix}$$

Riemann solver
(in frame of cell face) \rightarrow $\begin{pmatrix} \rho \\ v \\ P \end{pmatrix} \rightarrow \mathbf{F}(\mathbf{U})$

Das bewegte Gitter kann auch beliebige bewegte Randbedingungen realisieren

MISCHEN EINER "KAFFEE-TASSE"



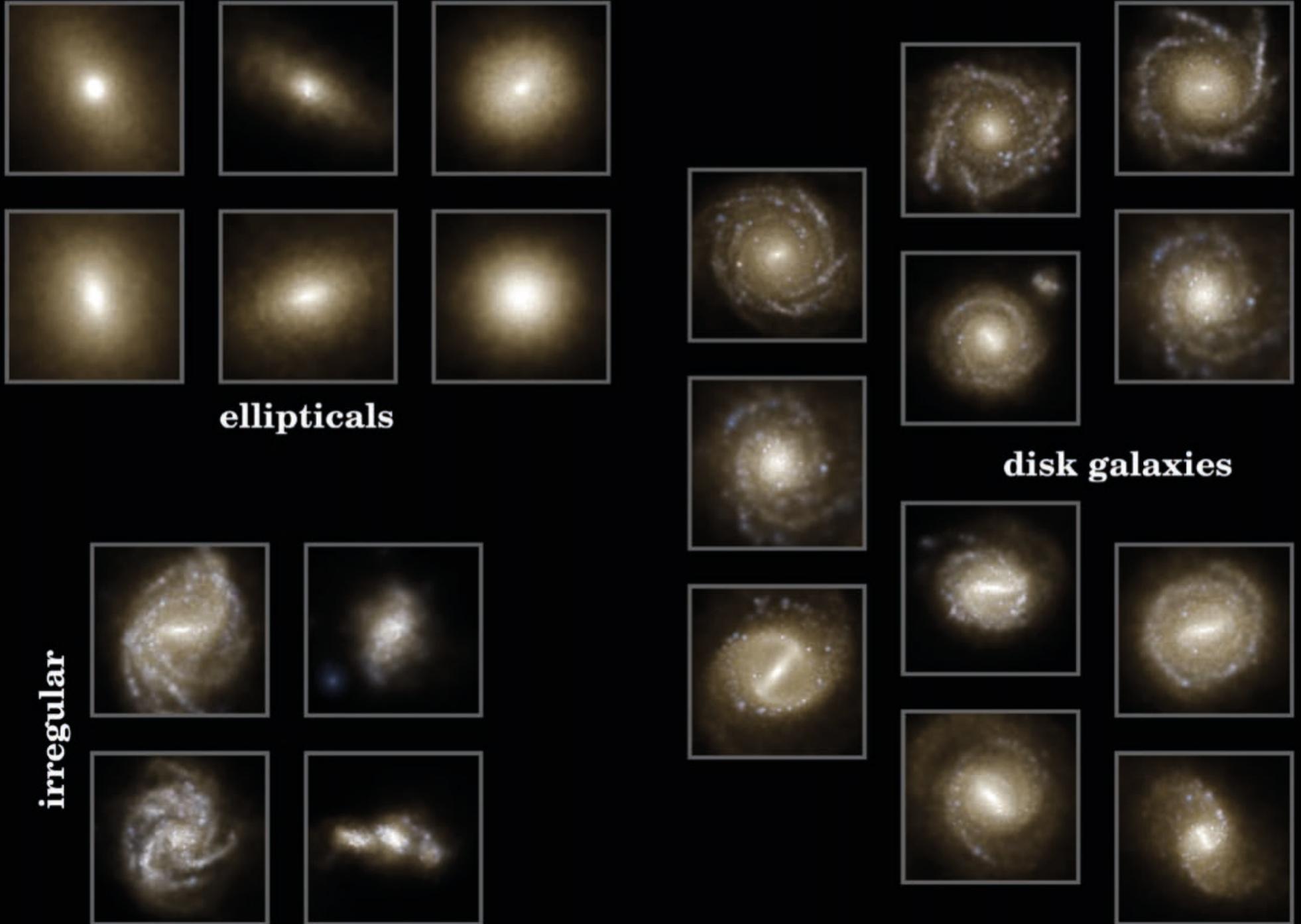


Illustris Simulation

Vogelsberger, Genel, Springel, Torrey, Sijacki, Xu, Snyder, Bird, Nelson, Hernquist

Die Illustris Simulation reproduziert die Morphologie von Galaxien

SIMULIERTES HUBBLE STIMMGABEL-DIAGRAMM

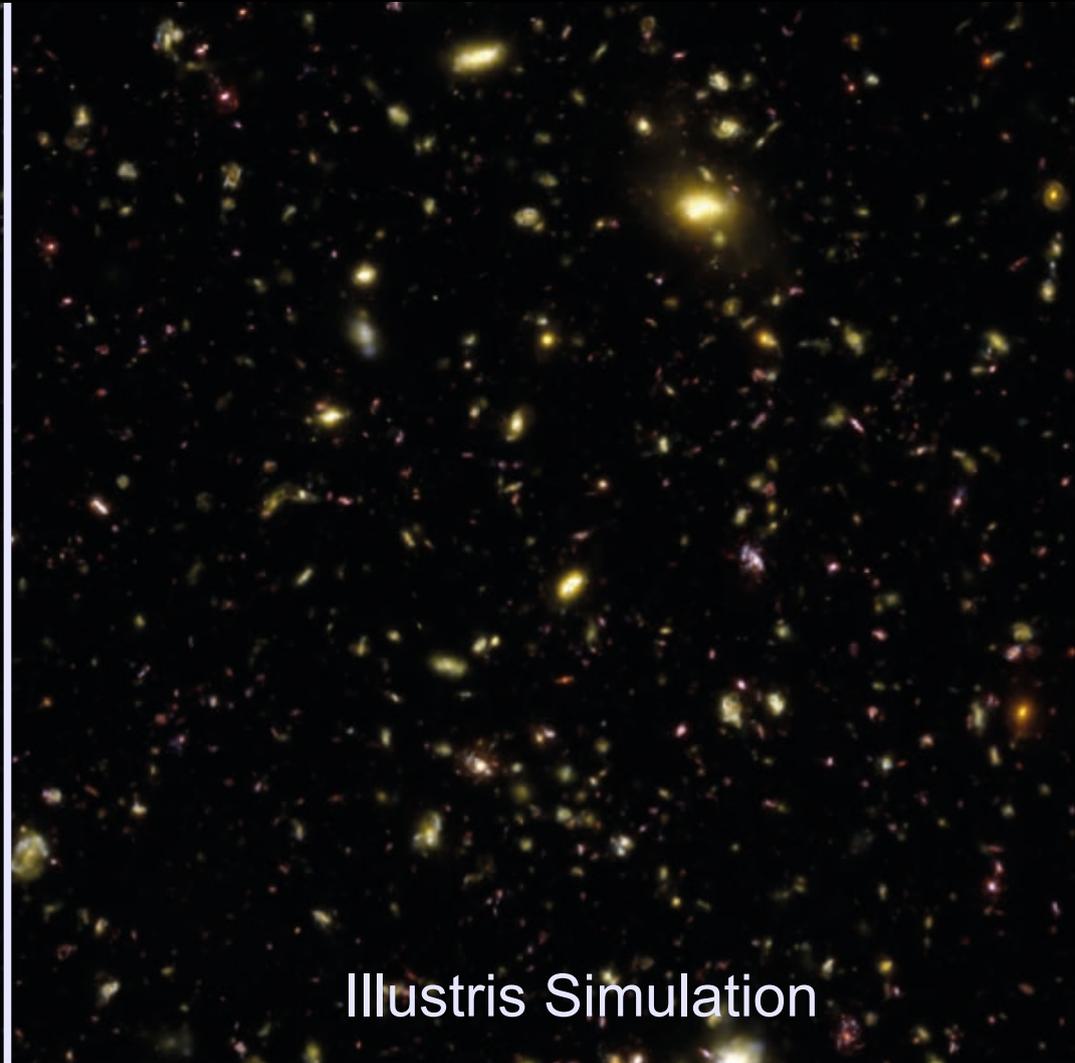


Künstliche Lichtkegel Beobachtungen sehen dem echten
Hubble Ultra Deep Field sehr ähnlich

GEGENÜBERSTELLUNG DES VIRTUELLEN UND ECHTEN UDF



Hubble UDF



Illustris Simulation

International Edition

CNN News Regions Video TV Features Opinions More...

World Sport Technology Entertainment Style Travel **Money**

How our universe grew up

By Elizabeth Landau, CNN

Updated 2305 GMT (0605 HKT) May 8, 2014

Illustris war der Mai-Eintrag der *Top Physics News of 2014* (physicsdatabase.com)

SECTIONS HOME SEARCH

The New York Times SUBSCRIBE NOW LOG IN

SPACE & COSMOS

Stalking the Shadow Universe

JULY 16, 2014

BBC Sign in News Sport

NEWS

Home Video World UK Business Tech Science

Science & Environment

Universe evolution recreated in lab

By Pallab Ghosh
Science correspondent, BBC News

7 May 2014 | Science & Environment

LE FIGARO · fr

En direct Le journal Premium Actualité Economie Sport Culture Lifestyle

LE FLASH ACTU 21h51 Football : Saint-Etienne tombe à Bastia

Une simulation retrace en deux minutes 13 milliards d'années d'histoire de l'Univers

ACTUALITE > SCIENCES & ENVIRONNEMENT Par Tristan Vey | Mis à jour le 08/05/2014 à 18:00 | Publié le 08/05/2014 à 17:18

L'AUTEUR

SPIEGEL ONLINE WISSENSCHAFT Login | Registrierung

Politik | Wirtschaft | Panorama | Sport | Kultur | Netzwelt | Wissenschaft | Gesundheit | einestages | Karriere | Uni | Reise | Auto | Stil

Nachrichten > Wissenschaft > Weltall > Kosmologie > Computer-Simulation Illustris zeigt Geschichte des Universums

Weltall-Simulation: 13 Milliarden Jahre in drei Minuten

Von Thorsten Dambeck



Die Deutsche Post hat diese Briefmarke am 18. Dez. 2018 herausgegeben.



Das Team hinter den “Next Generation Illustris” Simulationen

EINE ZUSAMMENARBEIT ZWISCHEN GARCHING, HEIDELBERG, HARVARD, UND DEM MIT



**Volker
Springel**

Heidelberg Institute for
Theoretical Studies
PI: Overall TNG Project



**Lars
Hernquist**

Harvard University



**Annalisa
Pillepich**

Max Planck Institute for
Astronomy, Heidelberg
Co-PI: TNG50 Project



**Rüdiger
Pakmor**

Heidelberg Institute for
Theoretical Studies



Dylan Nelson

Max Planck Institute for
Astrophysics, Garching
Co-PI: TNG50 Project



**Rainer
Weinberger**

Heidelberg Institute for
Theoretical Studies



**Federico
Marinacci**

Massachusetts Institute
of Technology



Jill Naiman

Harvard University



**Mark
Vogelsberger**

Massachusetts Institute
of Technology



Shy Genel

Center for Computational
Astrophysics, Flatiron
Institute



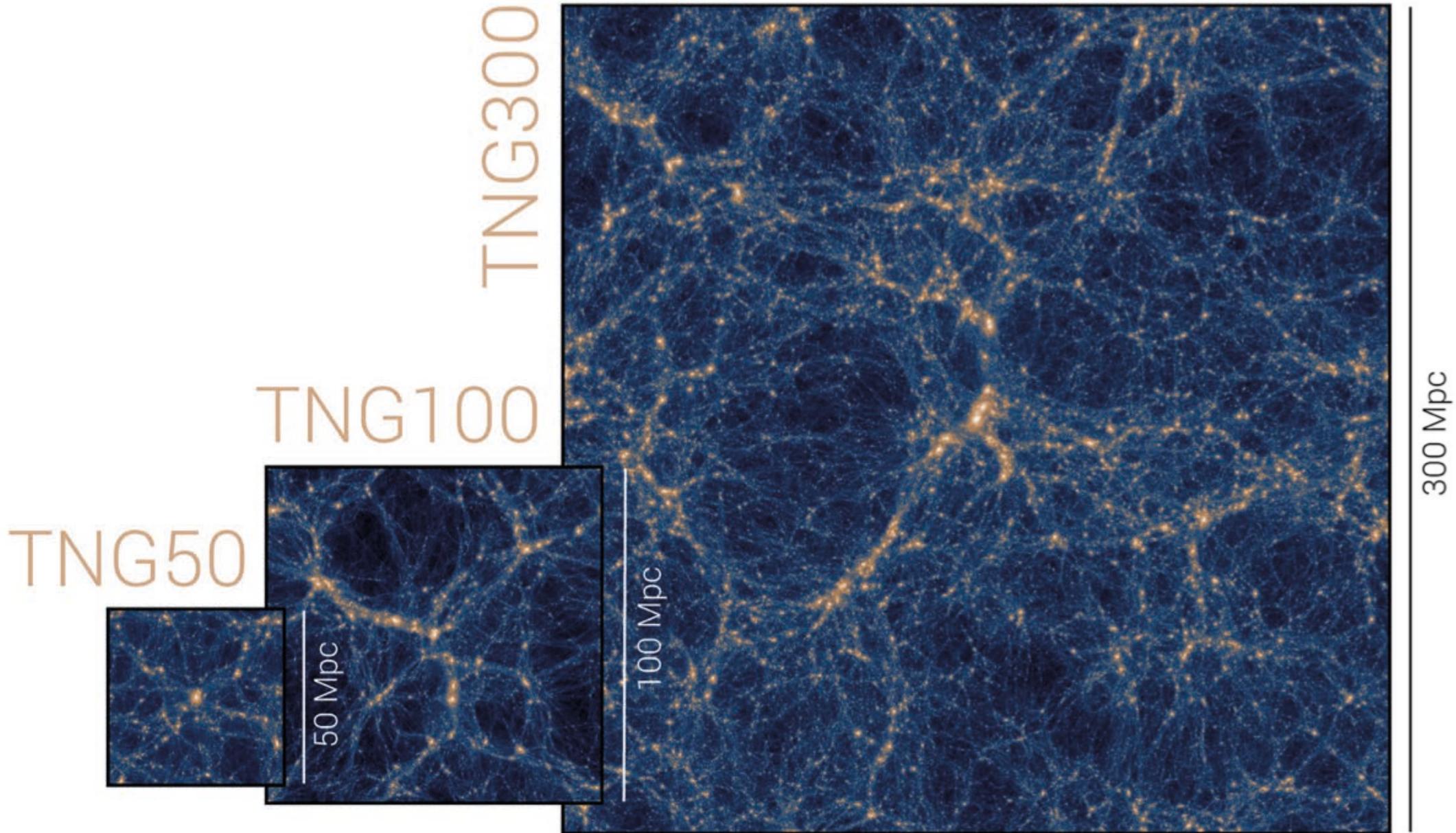
Paul Torrey

Massachusetts Institute
of Technology

The “Next Generation Illustris Simulations” (IllustrisTNG) are our novel, significantly improved models for cosmic structure formation

DIFFERENT SIMULATIONS OF THE ILLUSTRIS-TNG PROJECT

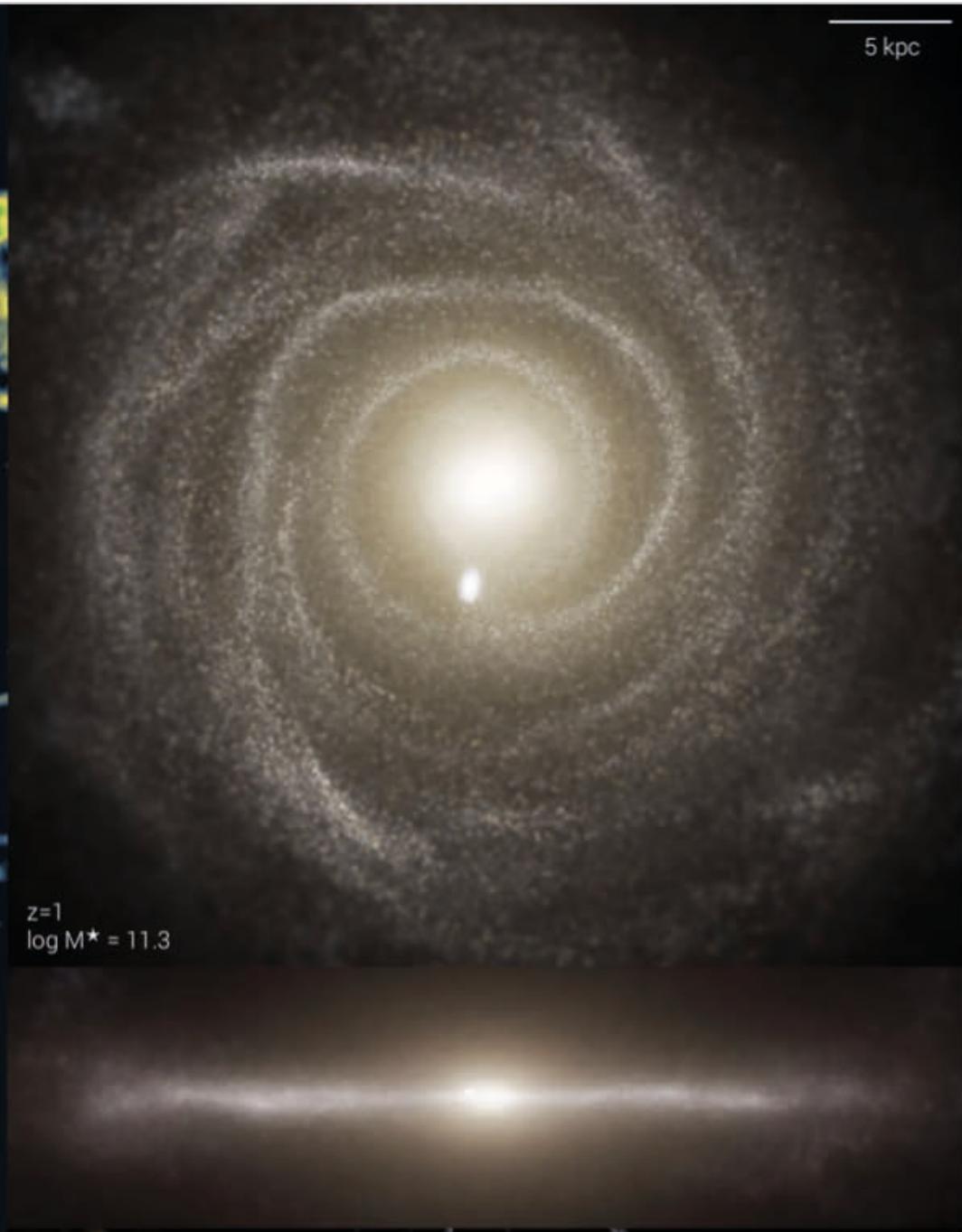
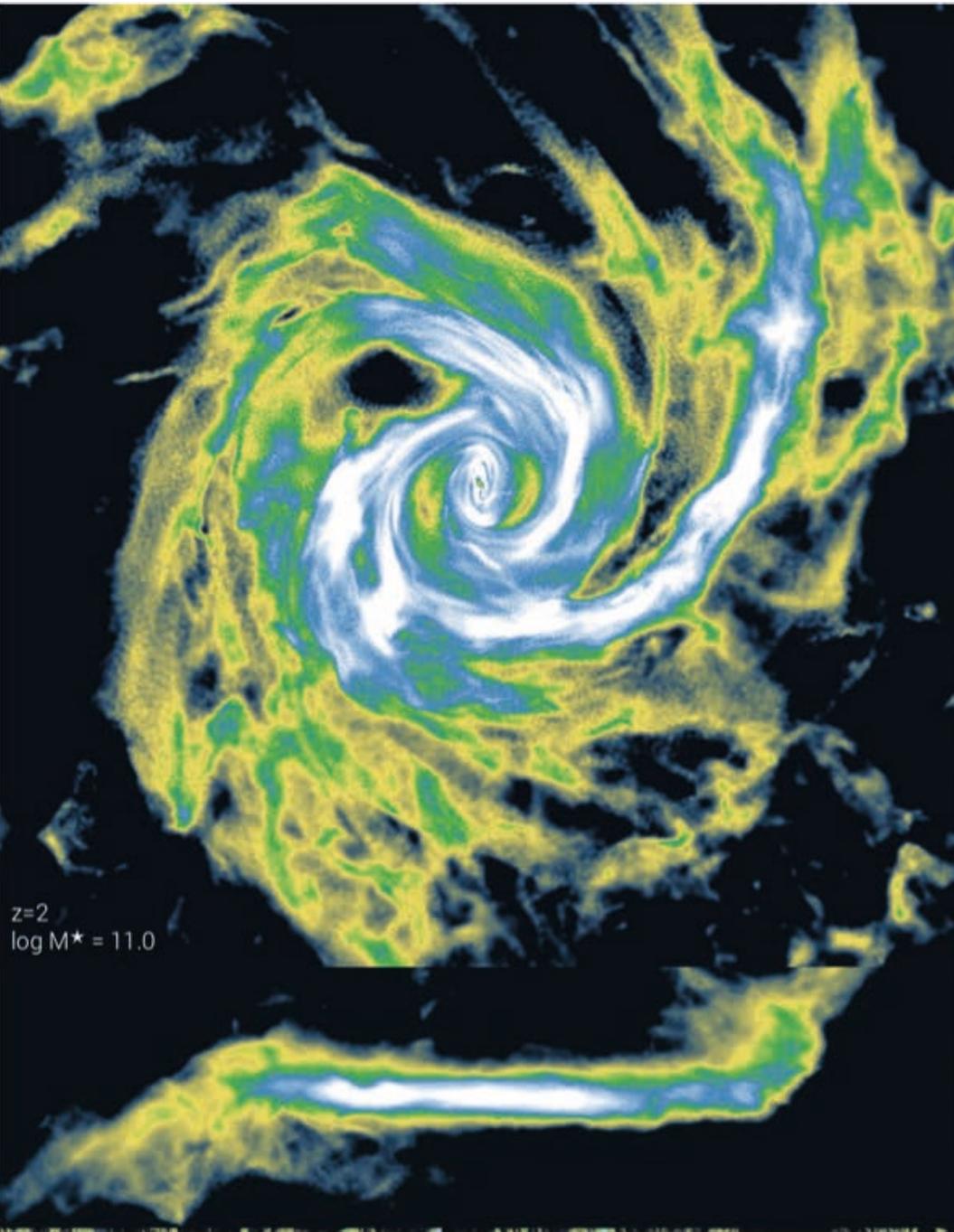
IllustrisTNG Collaboration (2017)



Noch nicht dagewesene Auflösung für kosmologische Rechnungen

BEISPIELE VON SCHEIBENGALAXIEN BEI $Z=2$ UND $Z=1$ IN TNG50

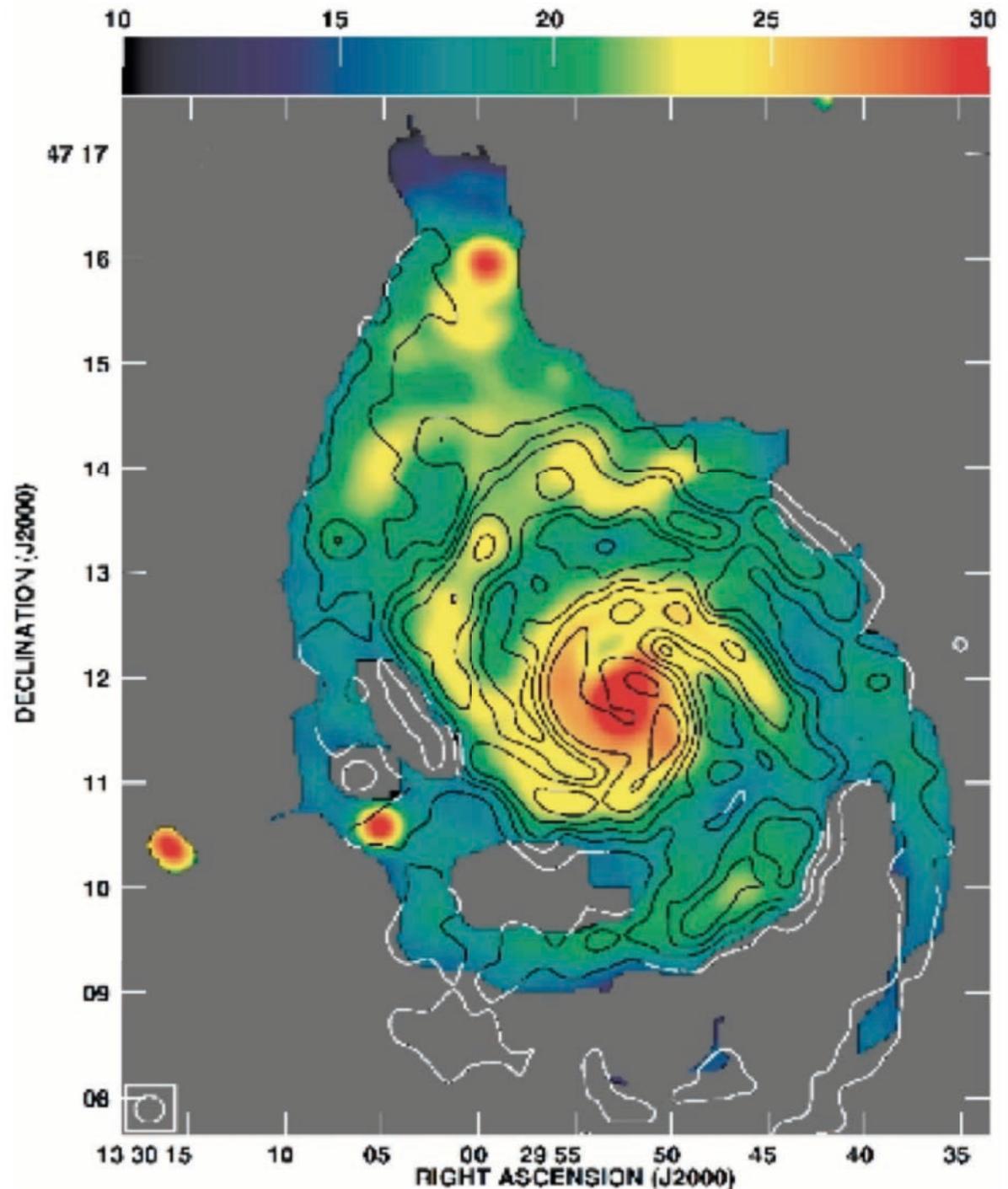
Nelson et al. (2018)



Magnetfelder spielen vermutlich eine wichtige Rolle in der Galaxientstehung

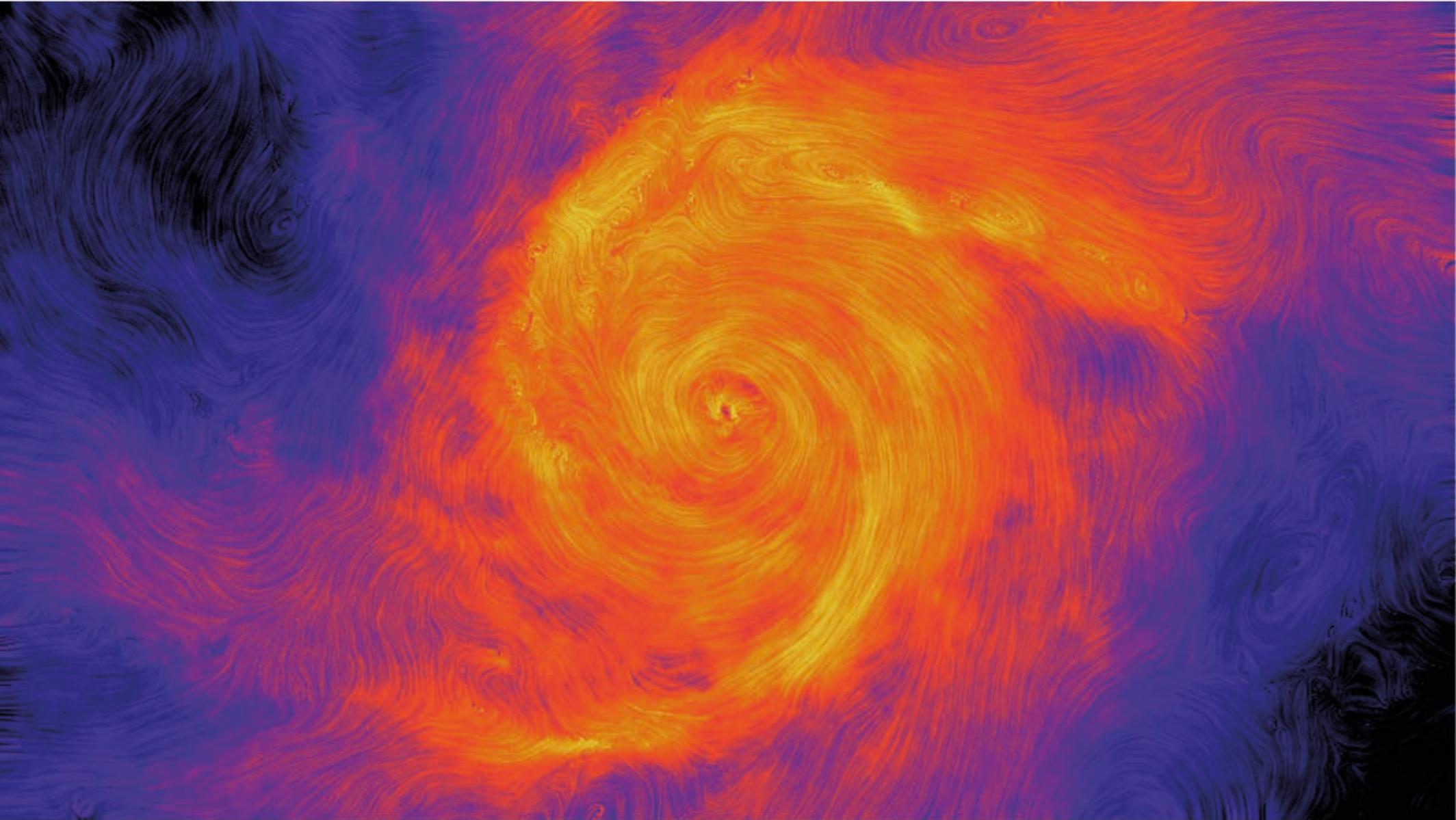
MAGNETFELDSTÄRKE IN M51

- Galaxien sind magnetisiert
- Typische Feldstärken in Spiralen betragen $\sim 10\mu\text{G}$
- Magnetfelder haben offenbar gleiche Energiedichte wie thermischer Gasdruck und kosmische Strahlung
- Dynamisch wichtig (?)



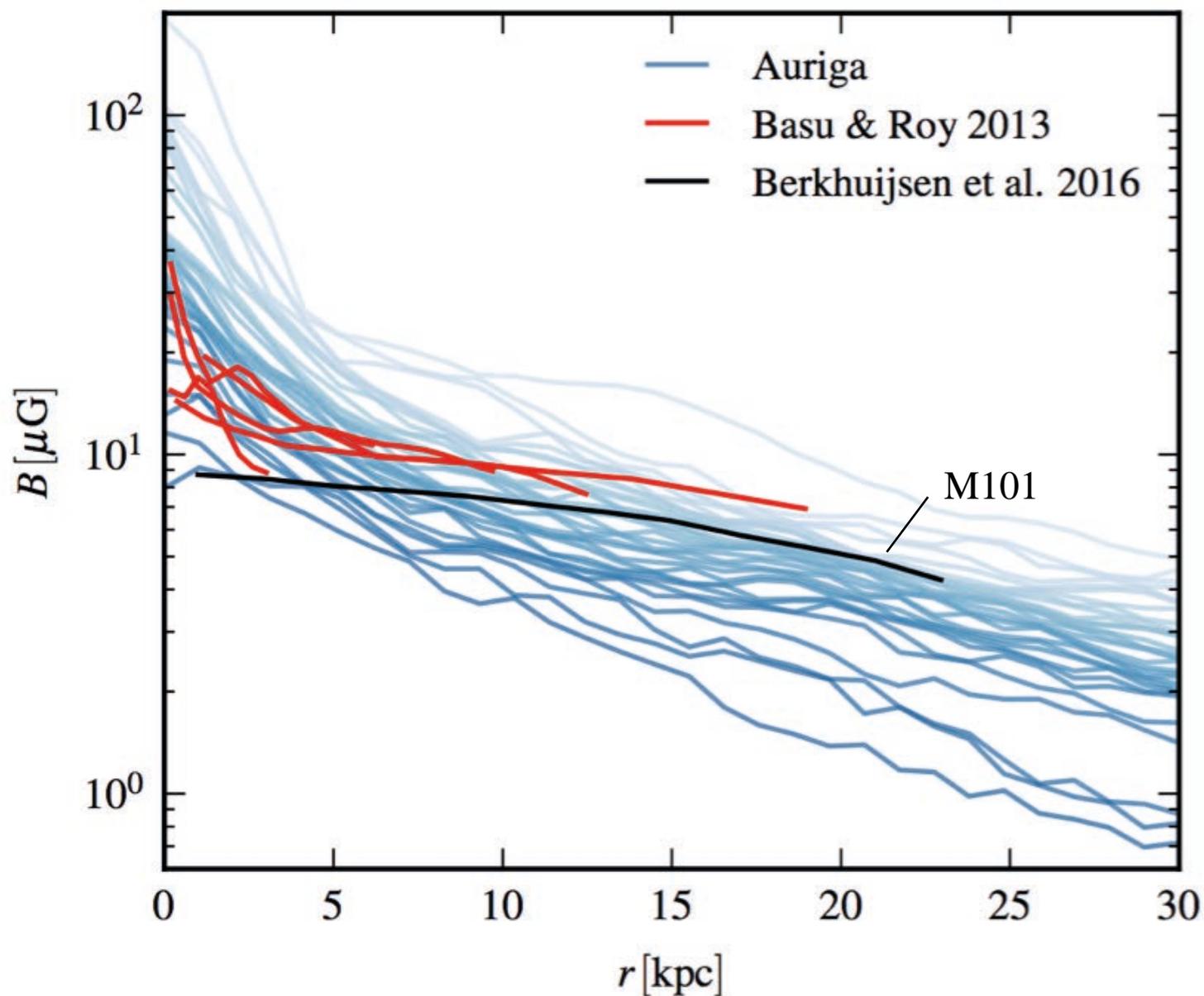
Für Scheibengalaxien sagen wir azimuthale Felder voraus

MAGNETISCHES FELD IN DER MITTELEBENE EINER SIMULIERTEN SCHEIBENGALAXIE



Die vorausgesagten Magnetfeldstärken stimmen gut mit Beobachtungen überein

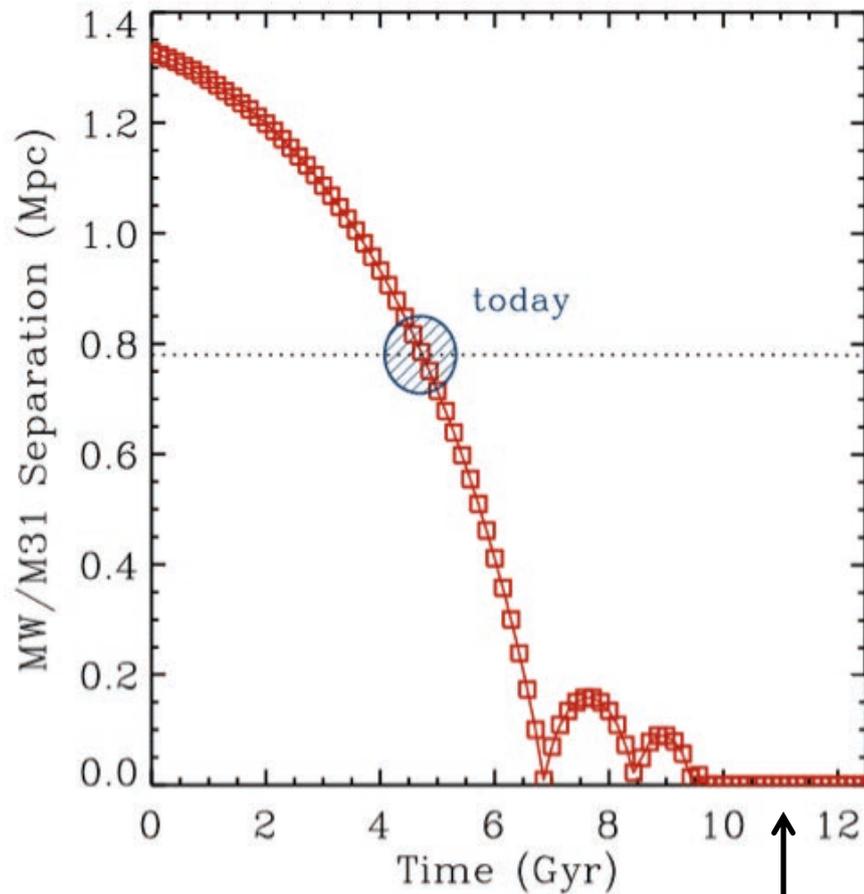
PROFILE DER MAGNETFELDSTÄRKE IN SIMULATIONEN UND BEOBACHTUNGEN





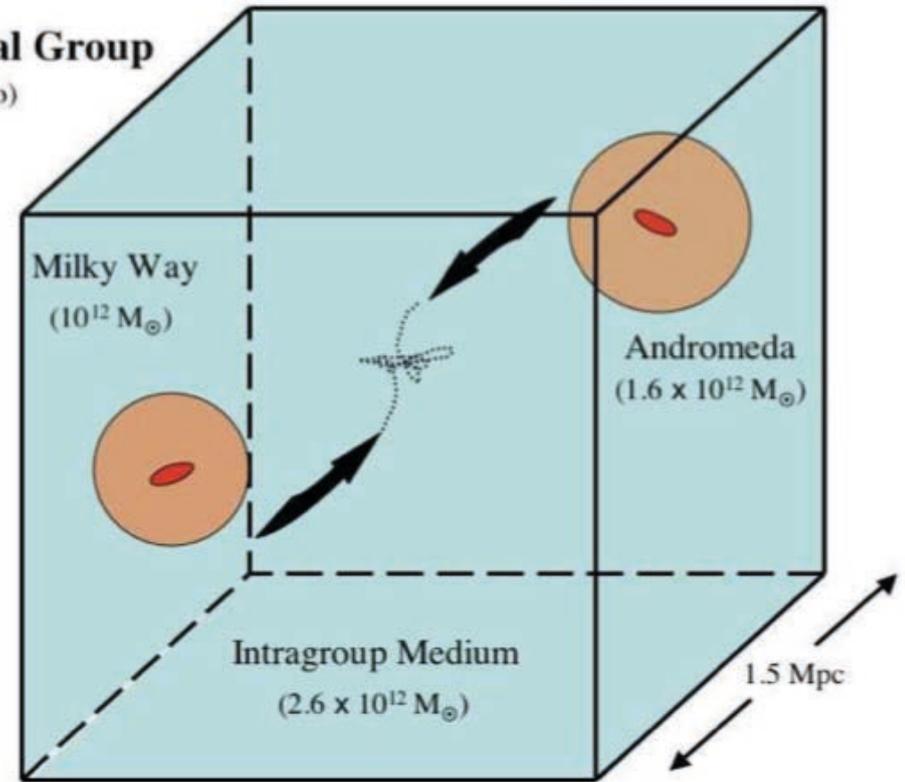
Antennae Galaxies

Die Milchstraße und Andromeda werden verschmelzen, noch innerhalb der Lebenszeit der Sonne



“Milkomeda”

The Local Group
(5 Gyr Ago)



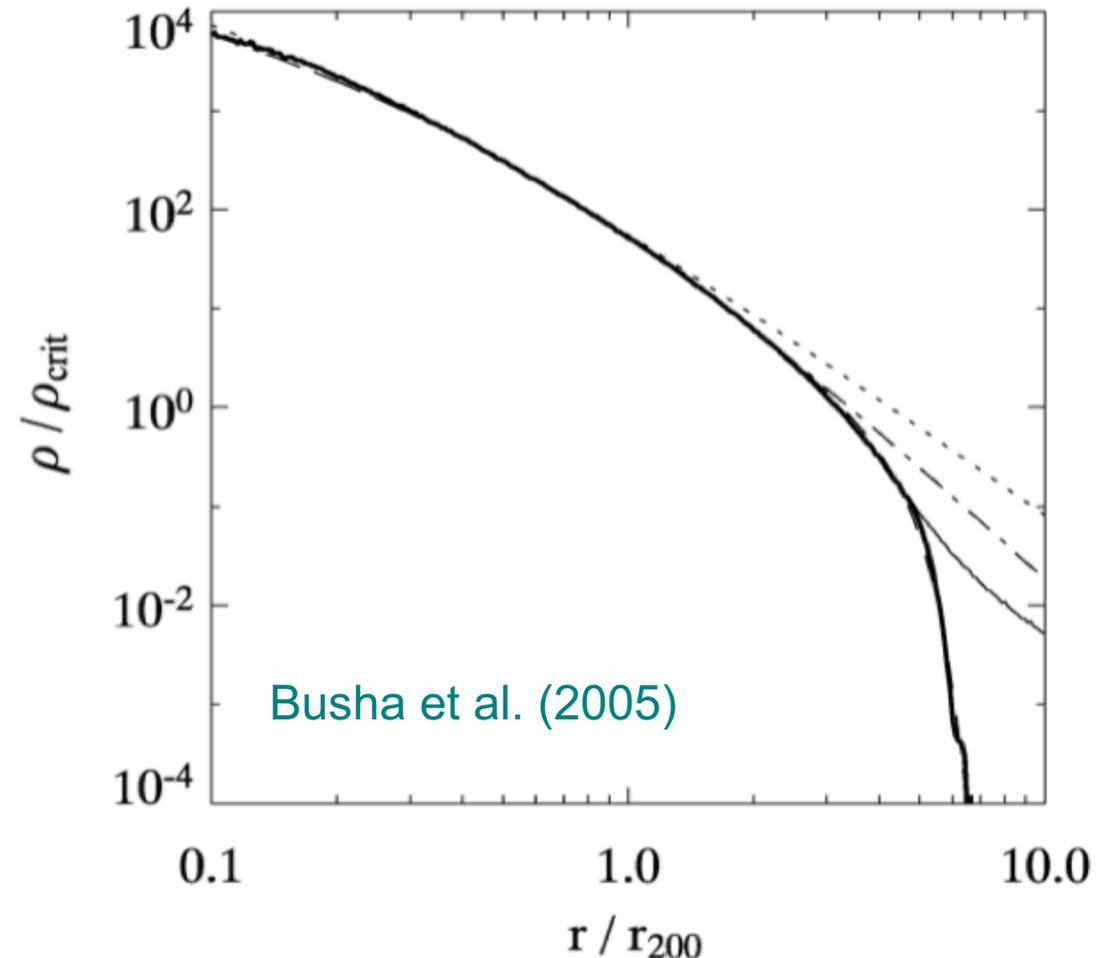
Cox & Loeb (2008)

In ferner Zukunft (~1000 Milliarden Jahre)...

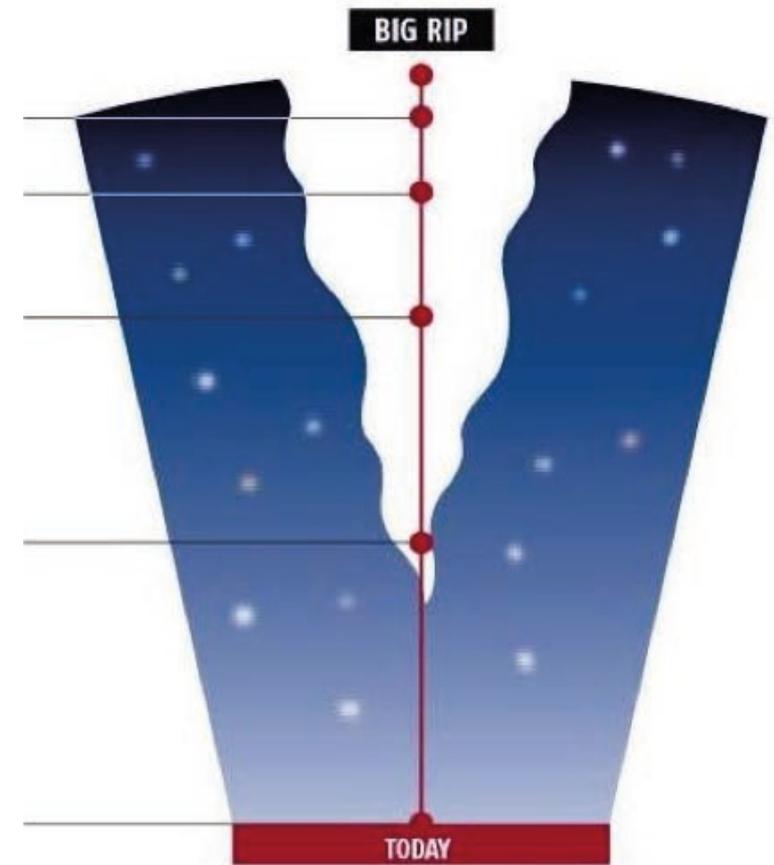
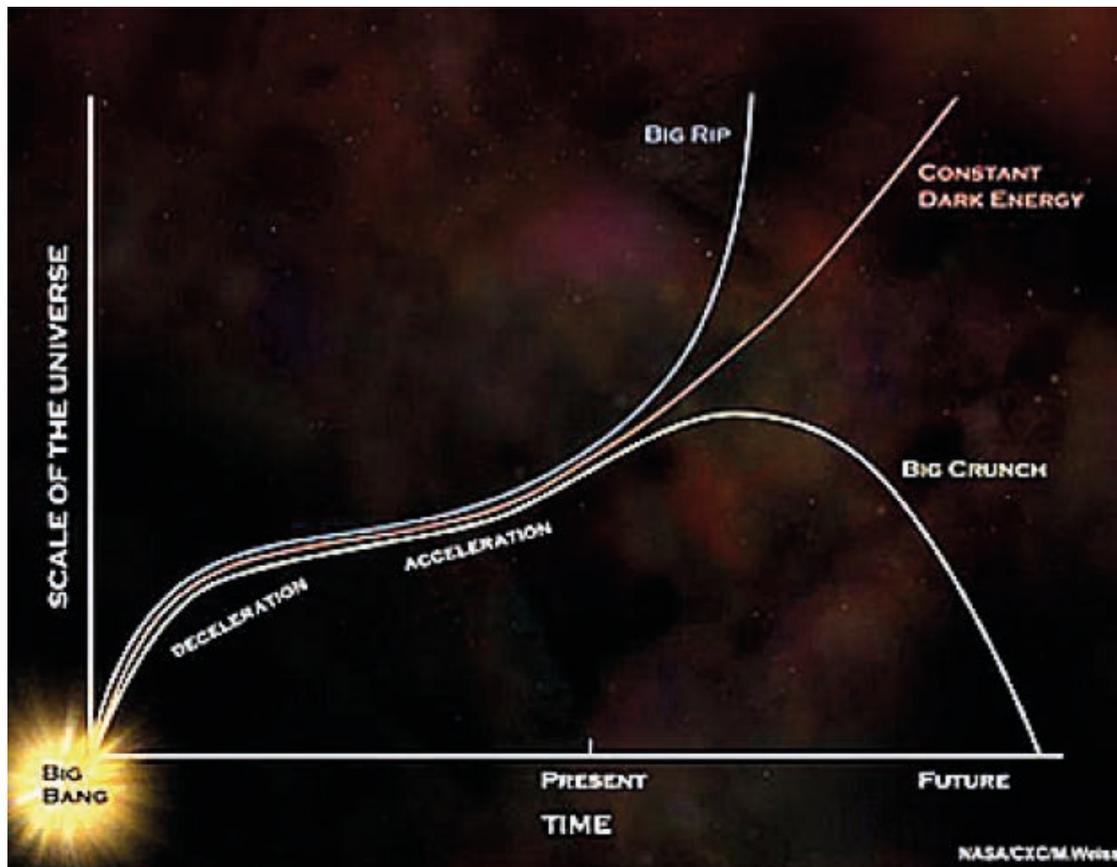
Alles Licht ferner Galaxien kann uns nicht mehr erreichen.

Wir sehen nur noch Milkomeda.

Die einzelnen
gravitativ gebundenen
Objekte werden immer
relaxierter, aber nicht
von der Expansion
auseinandergerissen.



Das große Reissen... ein denkbares Schicksal des Universums



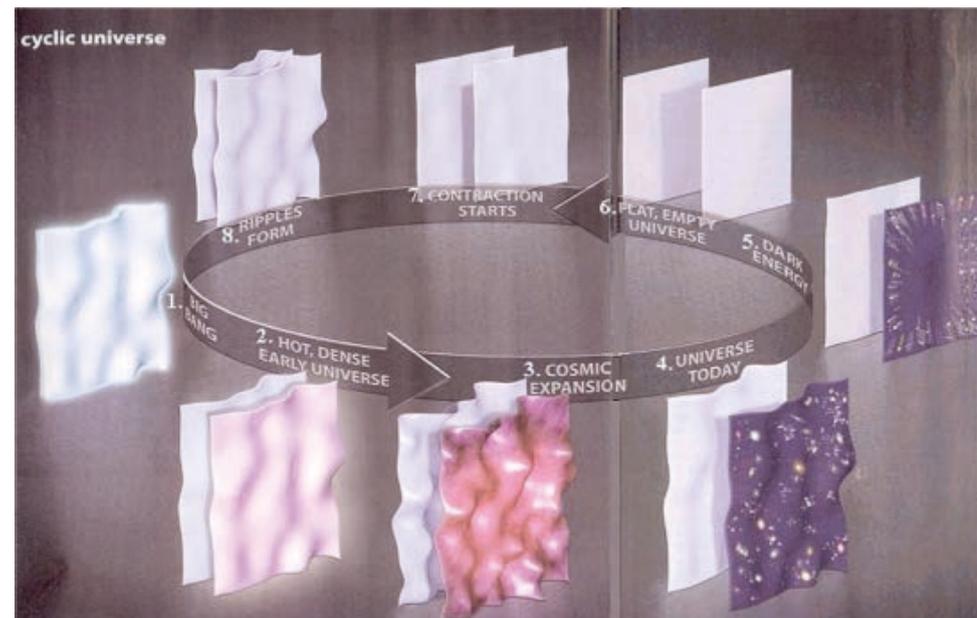
Die wichtigsten Möglichkeiten für das Schicksal des Universums

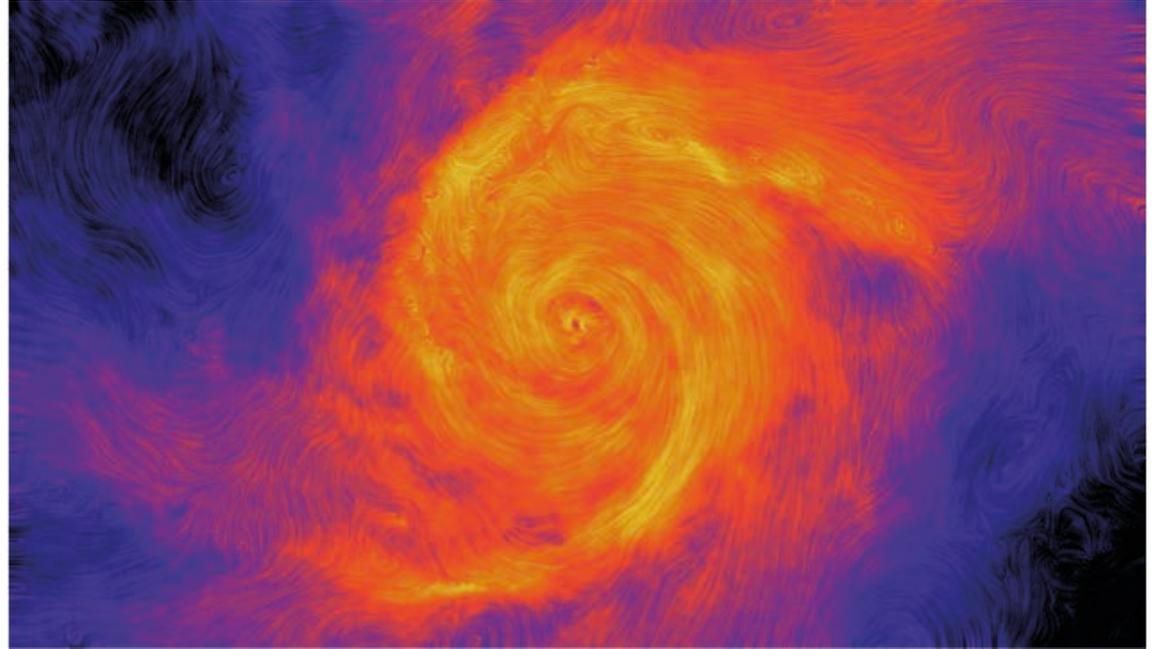
Big Chill Ewige Ausdehnung, Ausfrieren der Strukturen, Vereinzelung der Galaxien.

Big Rip Sogenannte Phantom Dunkle Energie wird mit der Zeit immer stärker. Alle Strukturen, selbst Atome werden nach endlicher Zeit zerrissen.

Big Crunch Zusammensturz des Universums nach endlicher Zeit in eine Singularität.

Zyklisches Universum





- **Die kosmologischen Parameter sind relativ genau bestimmt und erklären die kosmische Großraumstruktur schlüssig.** Die tatsächliche physikalische Natur der Dunklen Materie und der Dunklen Materie ist aber weiterhin rätselhaft.
- **Hydrodynamische Simulationen der Galaxienentstehung zeigen mittlerweile Erfolge.** Zum ersten Mal kann die Morphologie und die stellare Masse von Galaxien richtig vorausgesagt und die Entstehung der Milchstraße nachvollzogen werden.
- Diese Simulationsrechnungen stellen enorme Anforderungen an die numerische Beschreibung und erfordern **Supercomputer**.