Mark & Enzo
Riding early waves
by Ensslin & Ensslin

Internationales Jahr der Astronomie 2009

Aktivitäten des Max-Planck-Instituts für Astrophysik

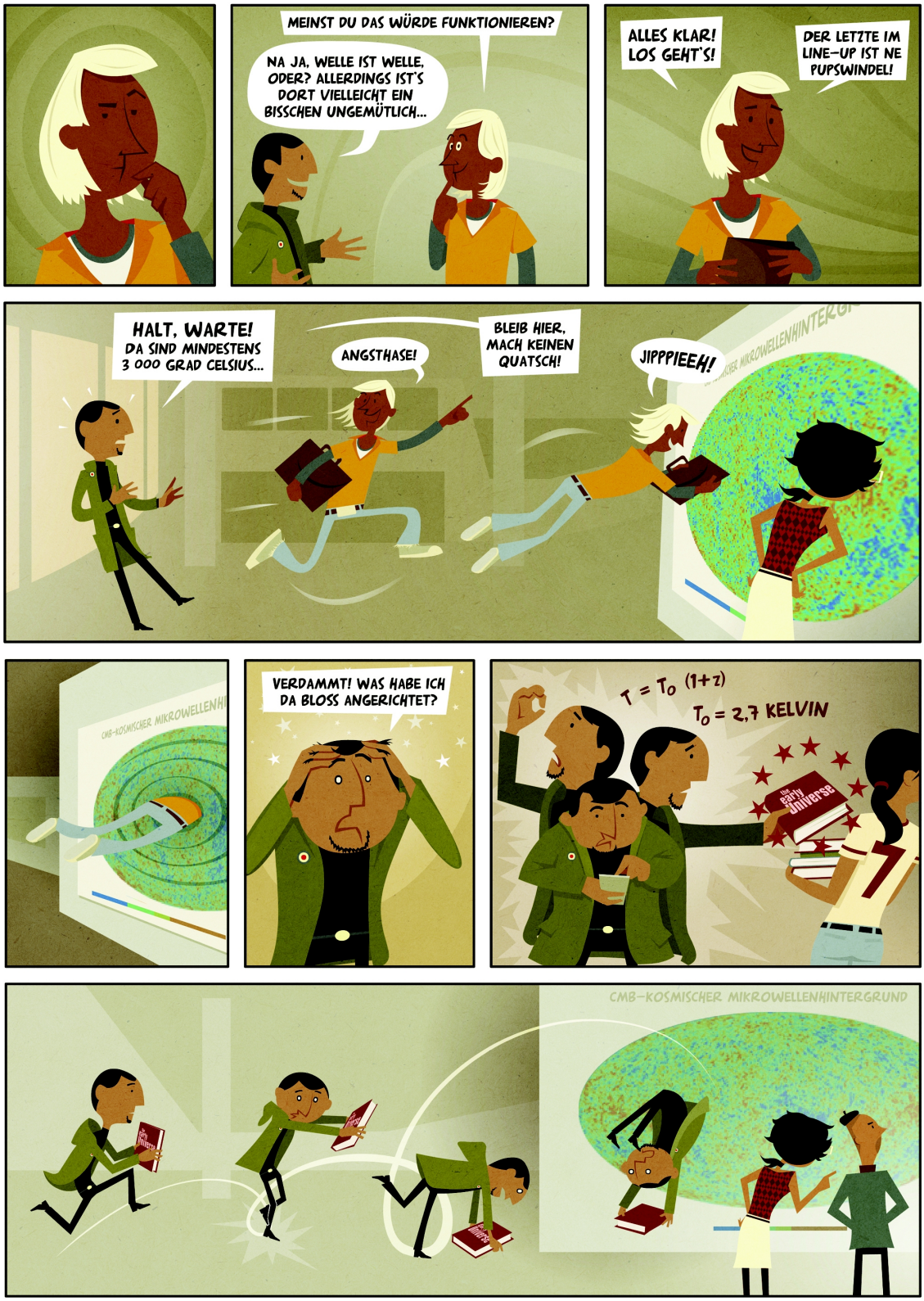
Vor vierhundert Jahren richtete der italienische Astronom Galilei erstmals ein Fernrohr an den Himmel und machte eine Reihe bedeutender Entdeckungen. Johannes Kepler veröffentlichte im selben Jahr 1609 seine "Astronomia nova", eines der bahnbrechendsten Bücher über unser Sonnensystem. In Erinnerung an diese Meilensteine in der Geschichte der Astronomie hat die Vollversammlung der Vereinten Nationen das Jahr 2009 offiziell zum Internationalen Jahr der Astronomie (IYA) erklärt. Das Max-Planck-Institut für Astrophysik (MPA) hat eine Vielzahl regionaler und überregionaler Projekte initiiert, um Kinder und Erwachsene für Astrophysik und Astronomie zu begeistern.

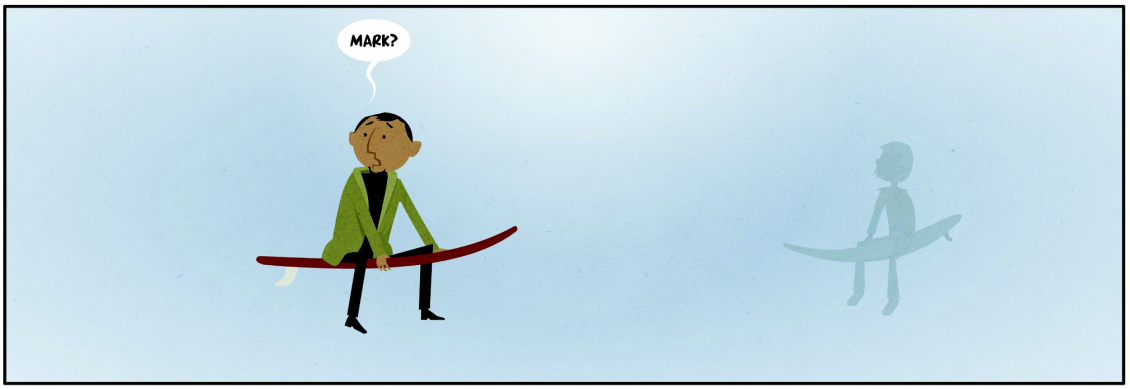
Riding early waves
Mark & Enzo
by Ensslin & Ensslin
DER URKNALL UND DAS FRÜHE UNIVERSUM SIND DOCH VERSTANDEN, DER MIKROWELLENHINTERGRUND SIEHT DOCH GENAU SO AUS WIE ES DIE THEORIE VORHERSAGT!
CMB – KOSMISCHER MIKROW
13.8 MILLIARDEN JAHRE NACH DEM URKNALL, EIN DONNERSTAGMORGEN IN DER KAFFEEECKE DES MAX-PLANCK-INSTITUTS FÜR ASTROPHYSIK
JA SCHON. ABER DIESE ANOMALIEN IM MIKROWELLENHINTERGRUND SIND DOCH KOMISCH! DEN 'COLD SPOT' DÜRFTE ES NICHT GEBEN ...
ACH DAS, DAS IST NUR EINE IRRELEVANTE STATISTISCHE FLUKTUATION!
ALOHA 'OE, SIGNORE ENZO.
CMB – KOSMISCHER MIKROWELLENHINTERGRUND

CMB – KOSMISCHER MIKROWELLENHINTERGRUND

DER KOSMISCHE MIKROWELLENHINTERGRUND, ODER AUCH KURZ CMB, BESTEHT AUS LICHT MIT ETWA EINEM MILLIMETER WELLENLÄNGE, WELCHES AUS ALLEN RICHTUNGEN DES UNIVERSUMS ZU UNS KOMMT. DIESES LICHT IST FAST SO ALT WIE DER KOSMOS SELBER, UND DURCHSTRÖMT DIESEN SEIT SEINER LETZTER STREUUNG VOR 14 MILLIARDEN JAHRE FAST GERADLINIG. WIR KÖNNEN ALSO EINE MIKROWELLEN-PHOTOGRAPHIE DES FRÜHEN UNIVERSUMS MACHEN UND DABEI FESTSTELLEN, DASS DIESES IM ALTER VON 380.000 JAHREN NACH DEM URKNALL EXTREM GLEICHFÖRMIG GEWESEN SEIN MUSS, DENN DER CMB IST EXTREM EINTÖNIG UND ZEIGT FAST KEINE STRUKTUR.

BIN DANN SOGAR NOCH VOR SONNENAUFGANG AM POINT RAUSGEPADDELT UM ALLEINE ZU SEIN. ABER DA SASS AUCH SCHON DIE GANZE BAGGAGE!
GIBT ES DENN NIRGENDS MEHR EINEN SPOT, AN DEM NICHT RUND UM DIE UHR DIE GANZE ROBBENKOLONIE SITZT?
ALASKA? NORWEGEN? DIE ALEUTEN?
SEHR WITZIG. ICH MEIN ES ERNST.
ABER HERR KOLLEGE...
UND DIE KOSMISCHE ACHSE DES BÖSEN? DIE GRÖSSTEN STRUKTUREN IM UNIVERSUM DEUTEN IN DIE GLEICHE RICHTUNG!
... EINE ILLUSION, WUNSCH-DENKEN, A-POSTERIORI ANALYSE, OBSKURER ALS KAFFEESATZLESEN ....
FRÜHES UNIVERSUM?
MIKROWELLEN?
SURFEN?
COLD SPOT?
KAFFEESATZ?
DU WILLST WELLEN FÜR DICH GANZ ALLEINE?
ICH WEISS WO DU VIELLEICHT DIE ERSTEN WELLEN ÜBERHAUPT UND AUCH NOCH VOR DEM ERSTEN SONNENAUFGANG FINDEN KANNST.
WAHNSINN! WO?
DORT, IM FRÜHEN UNIVERSUM. NUN JA, IMMERHIN GIBT'S GARANTIERT KEINE SURFER DORT....ACH UND SONNEN AUCH NOCH NICHT...ABER WELLEN...
CMB-KOSMISCHER MIKROWELLENHINTERGRUND


MEINST DU DAS WÜRDE FUNKTIONIEREN?
NA JA, WELLE IST WELLE, ODER? ALLERDINGS IST'S DORT VIELLEICHT EIN BISSCHEN UNGEMÜTLICH...
ALLES KLAR! LOS GEHT'S!
DER LETZTE IM LINE-UP IST NE PUPSWINDEL!
HALT, WARTE! DA SIND MINDESTENS 3 000 GRAD CELSIUS...
ANGSTHASE!
BLEIB HIER, MACH KEINEN QUATSCH!
JIPPPIEEH!
CMB-KOSMISCHER MIKROWELLENHINTERGRUND
VERDAMMT! WAS HABE ICH DA BLOSS ANGERICHTET?
$T = T_0 (1+z)$
$T_0 = 2{,}7$ KELVIN
the geeky universe
CMB-KOSMISCHER MIKROWELLENHINTERGRUND



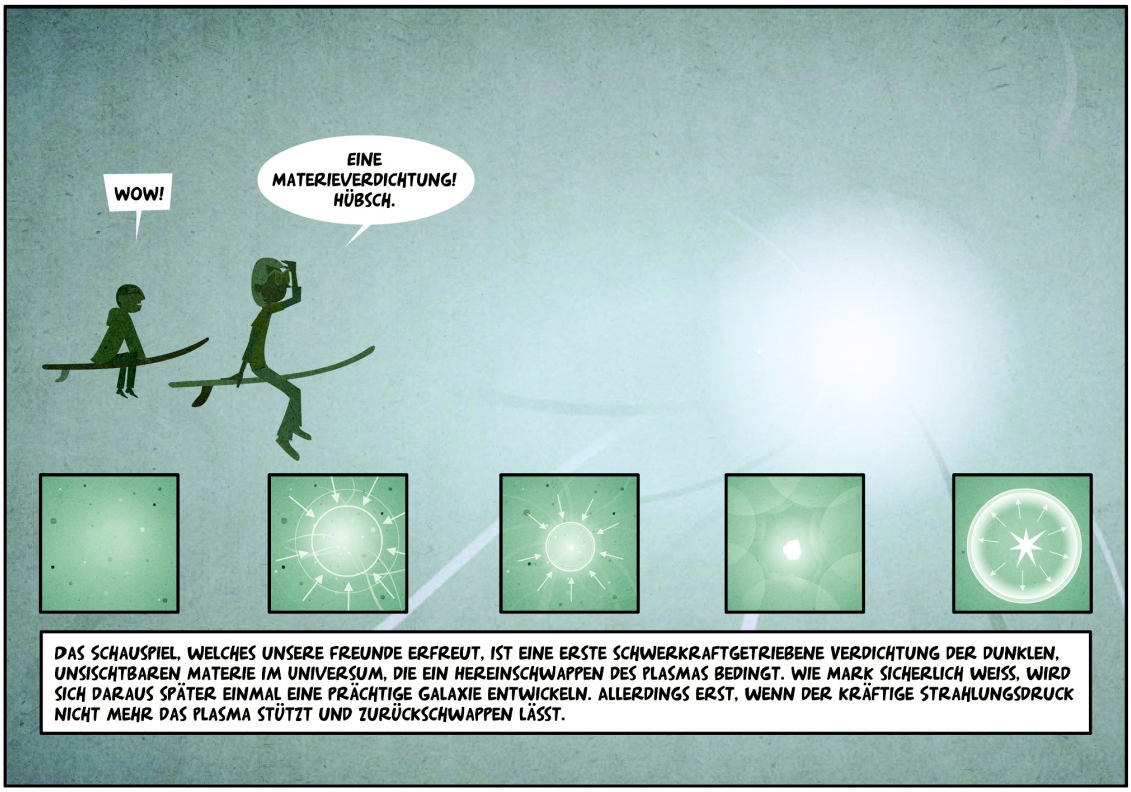
DAS FRÜHE UNIVERSUM

DAS FRÜHE UNIVERSUM WAR SEHR VERSCHIEDEN VON DEM HEUTIGEN. WIE DIESES DEHNTE ES SICH AUS UND MUSS SOMIT DICHTER UND DAHER AUCH HEISSER ALS DAS HEUTIGE UNIVERSUM GEWESEN SEIN. DIE ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE VON EINSTEIN ERLAUBT ES DIE EXPANSIONSGESCHICHTE DES KOSMOS ZU BERECHNEN UND DAMIT ANZUGEBEN, ZU WELCHEN EPOCHEN ES WIE GROSS, WIE DICHT UND WIE HEISS GEWESEN SEIN MUSS. ZWISCHEN LÄNGENAUSDEHNUNG DES KOSMOS UND DER TEMPERATUR DES CMBS BESTEHT EIN BESONDERS EINFACHER, REZIPROKER ZUSAMMENHANG: ALS DAS UNIVERSUM ZWEIMAL, ZEHNMAL ODER TAUSENDMAL KLEINER WAR, WAR ES DOPPELT, ZEHNFACH ODER TAUSENDFACH HEISSER. HEUTE IST DER CMB 2.7 KELVIN KALT, ABER IM JAHRE 380.000 NACH URKNALL, WELCHES WIR IM CMB SEHEN, WAR DAS UNIVERSUM 1100 MAL KLEINER, UND DAMIT DER CMB 3000 KELVIN ODER ETWA 2700 GRAD CELSIUS HEISS.

NOCH IMMER IM UNIVERSUM, ABER WANN? UND WIE KOMMEN WIR HIER WIEDER RAUS?
PAPPERLAPAPP! VORHER WILL ICH EIN PAAR WELLEN RUNTERRUTSCHEN.
ICH DENKE WIR SIND SO UNGEFÄHR IM JAHRE 5 000 NACH DEM URKNALL, WENN ICH DIE FARBTEMPERATUR RICHTIG LESE...
400 000 years
60 000 GRAD CELSIUS, ALS DAS UNIVERSUM 20 000 MAL KLEINER WAR ALS ...
60 000 GRAD CELSIUS? IST DAS NICHT SCHRECKLICH UNGESUND?
SOLLTE UNS EIGENTLICH IN SEKUNDEN VERBRUTZELN...
DIE SUPPE, IN DIE SICH UNSERE BEIDEN RECKEN EINGEBROCKT HABEN, BESTEHT AUS PROTONEN, ELEKTRONEN UND GANZ VIEL HEISSEM LICHT. DA WIR ES MIT ZWEI SEHR ERNSTHAFTEN UND KORREKTEN PHYSIKERN ZU TUN HABEN, SPRECHEN SIE VON EINEM STRAHLUNGSDOMINIERTEN PLASMA. UND DA WIR IHRE GESCHICHTE WEITERVERFOLGEN WOLLEN, LASSEN WIR SIE HIER NICHT VERBRUTZELN.
WO SIND DENN NUN DIE WELLEN? ICH SEH GAR NICHTS.
WAS HEISST DAS? 5 FUSS? 3 FUSS? ODER NOCH WENIGER?
TJA, VIELLEICHT SIND DIE NICHT BESONDERS GROSS....ZEHN HOCH MINUS FÜNF....
FARBTEMPERATUR & PLANCKKURVE & ALTER DES UNIVERSUMS
DAS LICHT, WELCHES DAS FRÜHE UNIVERSUM AUSFÜLLTE, UND HEUTE NOCH ALS MIKROWELLENSTRAHLUNG NACHGLÜHT, WAR HEISS UND HATTE EINE SO KURZE WELLENLÄNGE, DASS ES FÜR DAS MENSCHLICHE AUGE SICHTBAR GEWESEN WÄRE. ERST DIE SPÄTERE KOSMISCHE EXPANSION DES RAUMES HAT ES IN DIE FÜR UNS UNSICHTBAREN MIKROWELLEN GESTRECKT. DIE FARBE DES LICHTES HÄTTE SEINE TEMPERATUR VERRATEN. JE BLÄULICHER, DESTO HEISSER, UND JE RÖTLICHER, DESTO KÄLTER. DA DIE TEMPERATUR DER STRAHLUNG MIT DER AUSDEHNUNG UND DAMIT MIT DEM ALTER DES UNIVERSUMS ABNAHM, KÖNNTE MAN ANHAND SEINER FARBTEMPERATUR DIE GENAUE EPOCHE DES FRÜHEN UNIVERSUMS, IN DIE EINEN EINE ZEITREISE VERSCHLAGEN HABE KÖNNTE, BESTIMMEN.

DICHTEFLUKTUATIONEN

WIE GESAGT, DAS FRÜHE UNIVERSUM WAR EXTREM GLEICHFÖRMIG, UND RELATIVE UNTERSCHIEDE IN DER DICHTE ODER TEMPERATUR BETRUGEN NUR EIN TEIL VON HUNDERTTAUSEND, ALSO KONTRASTE VON ETWA 10^{-5}. ABER DIESE WINZIGEN MATERIEVERDICHTUNGEN WAREN DENNOCH SEHR BEDEUTEND, INSBESONDERE DIE IN DER UNSICHTBAREN, DUNKLEN MATERIE, DIE SICH VOLLKOMMEN UNBEEINDRUCKT VON DEM STRAHLUNGSDRUCK DES INTENSIVEN LICHTES ZUSAMMENBALLEN KONNTE. NAJA, JEDENFALLS ETWA AB DEM JAHRE 5.000 NACH URKNALL, ALS DIE DUNKLE MATERIE PLÖTZLICH DAS SCHWERSTE ZEUG IM UNIVERSUM WURDE UND ES DESWEGEN SOGAR SCHAFFTE, DIE NORMALE MATERIE, DIE ALS ELEKTRONEN-PROTONEN-PLASMA NATÜRLICH NOCH IMMER DEM LICHTDRUCK GEHORCHTE, AUCH EIN WENIG ZUM VERDICHTEN ZU BRINGEN.


WOW!
EINE MATERIEVERDICHTUNG! HÜBSCH.
DAS SCHAUSPIEL, WELCHES UNSERE FREUNDE ERFREUT, IST EINE ERSTE SCHWERKRAFTGETRIEBENE VERDICHTUNG DER DUNKLEN, UNSICHTBAREN MATERIE IM UNIVERSUM, DIE EIN HEREINSCHWAPPEN DES PLASMAS BEDINGT. WIE MARK SICHERLICH WEISS, WIRD SICH DARAUS SPÄTER EINMAL EINE PRÄCHTIGE GALAXIE ENTWICKELN. ALLERDINGS ERST, WENN DER KRÄFTIGE STRAHLUNGSDRUCK NICHT MEHR DAS PLASMA STÜTZT UND ZURÜCKSCHWAPPEN LÄSST.

HEY! DA GEHT DOCH WAS! DIE ERSTE GEHÖRT MIR!
ABER VIELLEICHT SOLLTEN WIR DOCH LIEBER VON HIER VERDUFTEN...

ACH, MACH DIR DOCH NICHT IMMER GLEICH INS HEMD.
UNVERNUNFT IST DEIN ZWEITER NAME, RICHTIG?

DIE BEKOMMST DU EH' NICHT. DIE IST VIEL ZU SCHNELL FÜR DICH.

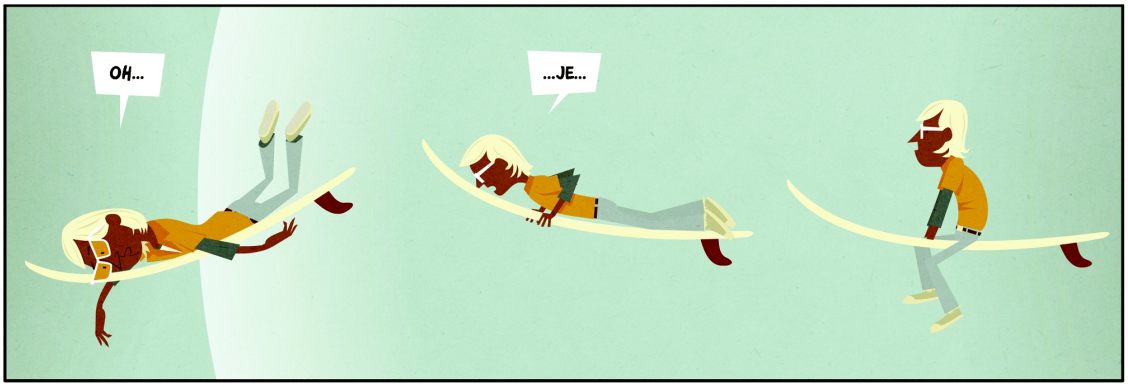
PAH! ICH BIN AUCH SCHNELL.
ACH JA? SCHAFFSTE AUCH ...

...SO UNGEFÄHR HALBE LICHTGESCHWINDIGKEIT?

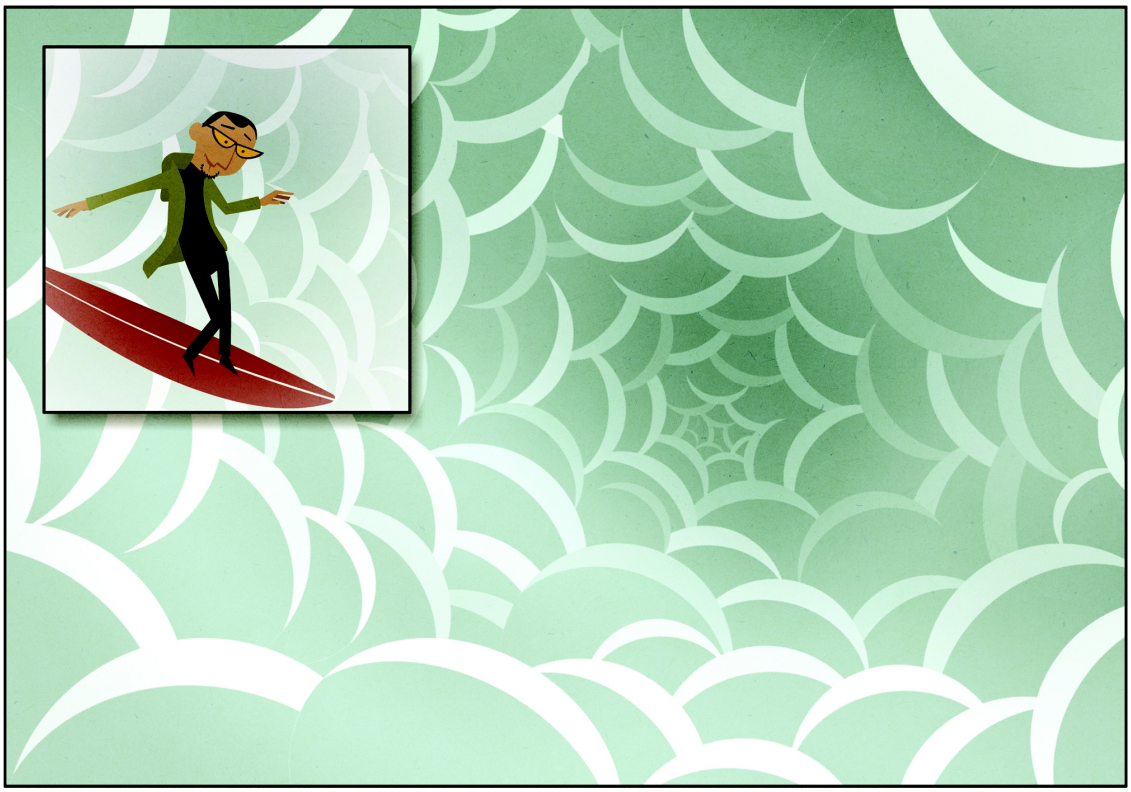
BARYON-AKKUSTISCHE-OSZILLATIONEN

DAS PLASMA IM FRÜHEN UNIVERSUM STEHT UNTER DEM HOHEN DRUCK DES LICHTFELDES. DIE DUNKLE MATERIE, DIE BESSER UNSICHTBARE MATERIE HEISSEN SOLLTE, SPÜRT DEN LICHTDRUCK NICHT, DENN SIE IST JA FÜR DIESES UNSICHTBAR. ALSO KANN DIE DUNKLE MATERIE SICH UNTER IHRER EIGENEN SCHWERKRAFT ZUSAMMENBALLEN, UND ZWAR BEVORZUGT DORT, WO SICH IN DEN ALLERERSTEN SEKUNDENBRUCHTEILEN DES UNIVERSUMS EINE WINZIGKEIT MEHR VON IHR ERZEUGT WORDEN WAR. AUS DIESEN VERDICHTUNGEN WERDEN SICH SPÄTER DIE GALAXIEN BILDEN.

DAS PLASMA WÜRDE AUCH GERNE DER SCHWERKRAFT FOLGEN UND SICH AN DENSELBEN STELLEN VERDICHTEN. DOCH DER DABEI STEIGENDE LICHTDRUCK WIRFT JEGLICHE PLASMAVERDICHTUNGEN WIEDER AUSEINANDER. DAS PLASMA SCHWINGT DARAUF IM WECHSELSPIEL DER SCHWERKRAFT DER DUNKLEN MATERIE UND DEM LICHTDRUCKS. DABEI ENTSTEHEN SCHALLWELLEN, DIE MIT ETWA HALBER LICHTGESCHWINDIGKEIT DURCH DEN RAUM JAGEN. DIESE SIND IN DEN HEUTIGEN PHOTOGRAPHIEN DES CMBS DEUTLICH SICHTBAR, DA DAS CMB-LICHT SELBER NICHT UNWESENTLICH AN IHNEN BETEILIGT WAR.

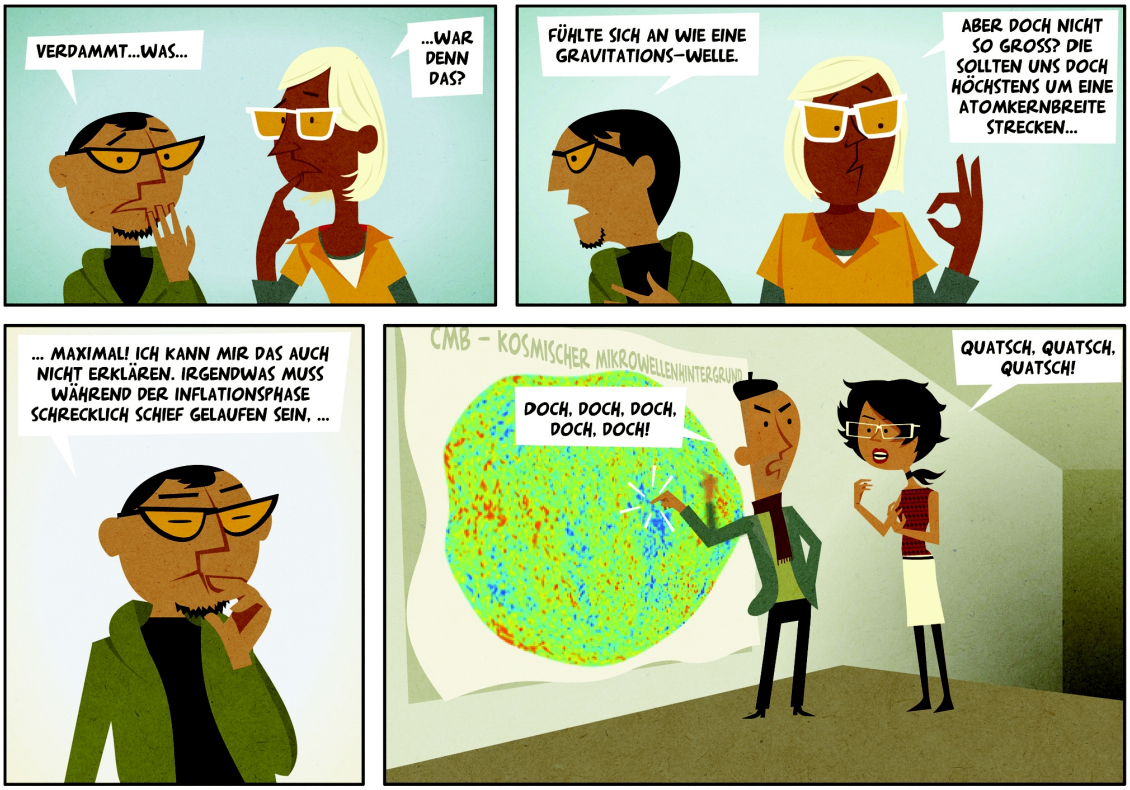


HEY, MICH ZIEHT'S HIER REIN.
KLASSE! GO FOR IT!
WAS MUSS ICH MACHEN?
LOS! PADDEL WAS DAS ZEUG HÄLT, DER REST ERGIBT SICH SCHON, HA HA HA!
OH JE OH JE OOOOH JEEEE!!!
AAAAH!
OOOOH!
UIUIUIUIUI!!
YEAAAAH!
DER AUFMERKSAME LESER MAG SICH ÜBER LEICHTE UNTERSCHIEDE ZWISCHEN DEN ERLEBNISSEN UNSERER FREUNDE UND DEM, WAS ER IN DER SCHULE ÜBER DAS FRÜHE UNIVERSUM GELERNT HAT, WUNDERN. WIE ER ABER IM SELBSTVERSUCH LEICHT ÜBERPRÜFEN KANN, SIND SOLCHE GEOMETRISCHEN UND TEMPORALEN WAHRNEHMUNGSVERZERRUNGEN STETE, ABER HARMLOSE BEGLEITERSCHEINUNGEN VON ZEITREISEN.



MA CHE CAVOLO!
OH JE, GLEICH KNALLTS!
WOOOOHOOOOOOOO!

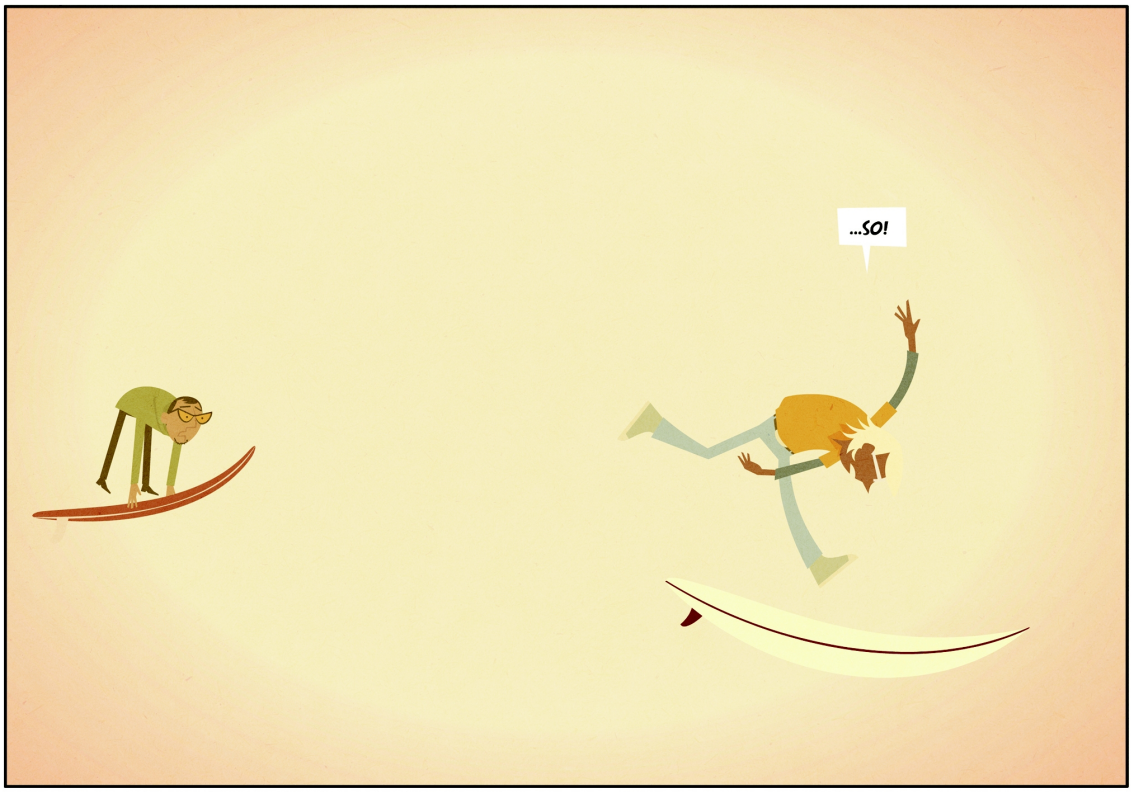
WAAAAH! FANTASTICO!!!
WOW...JA, ICH....HAB'S.....GESEHEN!
DAS WAREN MINDESTENS...
GNRRFF..
TBLLBS...
BLABRBBS...
GGRRAAWSN...

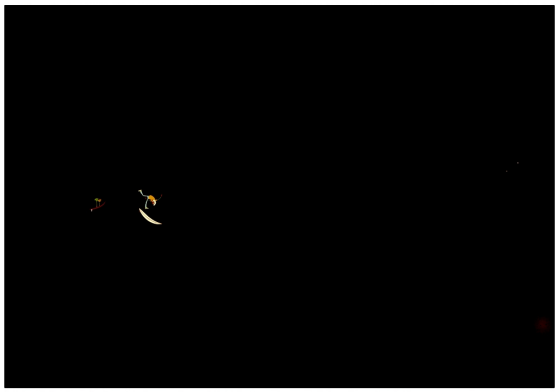


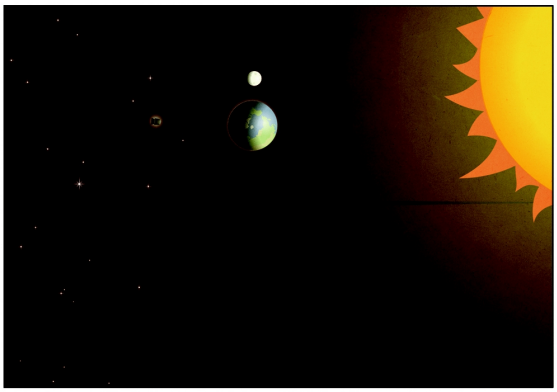
GRAVITATIONSWELLEN UND INFLATIONSPHASE

DER RAUM UNSERES UNIVERSUMS IST SEHR VERLÄSSLICH UND KAUM ETWAS KANN IHN GROSS ERSCHÜTTERN. AUSNAHMEN SIND BESONDERS GEWALTIGE EREIGNISSE WIE DER KOLLAPS EINES STERNS ODER DIE VERSCHMELZUNG VON SCHWARZEN LÖCHERN, DIE EIN AUCH IN DER FERNE MESSBARES BEBEN DES RAUMES AUSLÖSEN KÖNNEN, WELCHES GEMEINHIN ALS GRAVITATIONSWELLE BEZEICHNET WIRD. ABER SELBST DIESE GEWALTIGE EREIGNISSE VERZERREN IRDISCHE ODER GAR MENSCHLICHE LÄNGEN NUR UM BRUCHTEILE EINES ATOMDURCHMESSERS. IM FRÜHEN UNIVERSUM KÖNNTEN INNERHALB DER ERSTEN SEKUNDENBRUCHTEILE SOLCHE GRAVITATIONSWELLEN ANGEREGT WORDEN SEIN. AUSLÖSER, SO WIRD SPEKULIERT, SOLLTE DIE SO GENANNTE INFLATIONSPHASE GEWESEN SEIN, EINE EPOCHE GANZ KURZ NACH DEM URKNALL ($<10^{-35}$ SEKUNDEN) IN DER SICH DER RAUM EXPLOSIONSARTIG AUSGEDEHNT HABEN SOLL.

ACH, WAS SOLL'S! ICH WILL JETZT AUCH SO EINEN RITT!
DU, ICH GLAUB ES IST SCHON ECHT SPÄT.
WIESO SPÄT? DIE SONNE IST JA NOCH NICHT MAL AUFGEGANGEN.
ES GIBT NOCH GAR KEINE SONNEN...
UND AUCH NOCH KEINEN MOND UND KEINE STERNE? *SCHLUCHZ*
ABER DAS UNIVERSUM HAT SICH WEITER AUSGEDEHNT, UND ES WIRD KÄLTER. NUR NOCH 3 000 KELVIN ...
JA, ES IST SPÄT! 380 000 JAHRE NACH URKNALL. DAS UNIVERSUM IST NUN GRÖSSER, KÄLTER UND KURZ DAVOR SICH DRASTISCH ZU VERÄNDERN.
PFF, MIR EGAL. IST JEDENFALLS EINER DER COOLSTEN SPOTS AN DEM ICH JEMALS GEWESEN BIN. ICH PADDEL DA JETZT REIN UND RUTSCH 'NE WELLE RUNTER. WAS SOLL SCHON PASSIEREN...
Cosmic History - color-based timescale
380 000 years
plasma recombination
DAS PLASMA WIRD BALD ENTKOPPELN, ELEKTRONEN UND PROTONEN KOMBINIEREN ZU WASSERSTOFF ...
NA UND?
NA, ES WIRD KLAR WERDEN, FREIE SICHT, KEINE FREIEN ELEKTRONEN, DIE DAS LICHT STREUEN ....
SO WHAT?
... UND KEINE, DIE AUF MAGNETFELDER REAGIEREN .. UND WIR SITZEN DOCH AUFMAGNETO-PLASMA-SURFBRETTERN...
ACH...





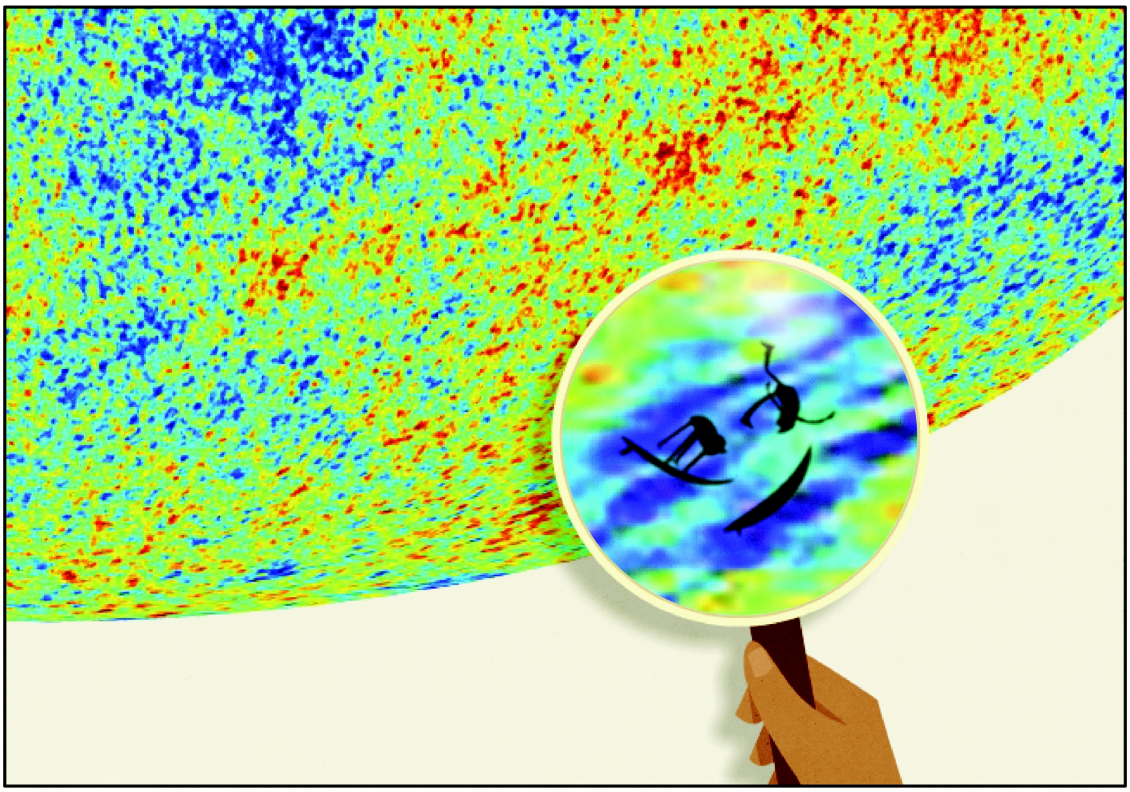


CMB SATELLITEN: COBE, WMAP & PLANCK

DER CMB UND SEINE TEMPERATURUNTERSCHIEDE KANN MIT EMPFINDLICHEN MESSINSTRUMENTEN KARTOGRAPHIERT WERDEN. DAFÜR MUSS NUR DIE AUS ALLEN RICHTUNGEN AUF UNS HEREIN STRÖMENDE MIKROWELLENSTRAHLUNG GENAU VERMESSEN UND VORDERGRÜNDE WIE DIE STRAHLUNG UNSERER EIGENEN GALAXIE ABGETRENNT WERDEN. UM STÖREINFLÜSSE VON DER ERDE UND IHRER ATMOSPHÄRE MÖGLICHST AUSZUSCHALTEN, NIMMT MAN DIESE MESSUNG AM BESTEN IM WELTRAUM VOR. MITTLERWEILE GIBT ES DREI SATELLITENMISSIONEN, DIE DEN CMB MIT STEIGENDER GENAUIGKEIT VERMESSEN HABEN, ODER DIES NOCH TUN: COBE, WMAP UND PLANCK.

FLUKTUATIONEN IM KOSMISCHEN MIKROWELLENHINTERGRUND

ZWAR WAR DAS FRÜHE UNIVERSUM UND DAMIT AUCH DER CMB EXTREM GLEICHFÖRMIG, ABER DIE SICH BILDENDEN MATERIEVERDICHTUNGEN UND DIE DADURCH AUSGELÖSTEN SCHALLWELLEN HABEN WINZIGE FLUKTUATIONEN IN DER TEMPERATURVERTEILUNG DES CMBS HINTERLASSEN. DORT WO DIE AKUSTISCHEN OSZILLATIONEN DAS PLASMA UND DAS LICHT VERDICHTET HABEN, IST ES ETWAS WÄRMER GEWORDEN, DORT WO ES AUSEINANDER GEZOGEN WURDE ETWAS KÄLTER. DA DAS UNIVERSUM UM 380.000 JAHRE NACH DEM URKNALL RECHT PLÖTZLICH FÜR LICHT DURCHSICHTIG WURDE, KÖNNEN WIR HEUTE DIESE TEMPERATURUNTERSCHIEDE IN DEM CMB NOCH SEHEN. DIE UNTERSCHIEDE ZU DEM IM MITTEL 3 KELVIN KALTEN CMB BETRAGEN NUR EINIGE HUNDERTTAUSENDSTEL GRAD KELVIN. IHRE RÄUMLICHEN ABMESSUNGEN DAMALS BETRUGEN EINE HALBE MILLION LICHTJAHRE, DER STRECKE DIE DIE SCHALLWELLEN SICH AUS EIGENER KRAFT UND DANK DER AUSDEHNUNG DES UNIVERSUMS ZURÜCKLEGEN KONNTEN. DIESE IST FÜR UNS AUF WINKELSKALEN VON EINEM GRAD AM CMB-HIMMEL SICHTBAR SIND.



COLD SPOT

DER CMB ENTHÄLT INFORMATIONEN ÜBER DEN AUFBAU UND DIE GEOMETRIE DES UNIVERSUMS, ÜBER SEINE GESCHICHTE UND DIE ZUSAMMENSETZUNG DER MATERIE DARIN. ER BIETET EINE DER BESTEN MÖGLICHKEITEN UNSERE VORSTELLUNGEN ÜBER DEN KOSMOS ZU ÜBERPRÜFEN UND ZU VERFEINERN. SELBSTVERSTÄNDLICH WURDE UND WIRD ER BENUTZT UM UNSERE VORSTELLUNGEN VOM URKNALL KRITISCH ZU TESTEN, UND HAT DIESE IM GROSSEN UND GANZEN BESTÄTIGT. EIN PAAR UNERWARTETE BESONDERHEITEN SIND ALLERDINGS DOCH IN IHM GEFUNDEN WORDEN. EINE DAVON IST DER SO GENANNTE COLD SPOT, EINER UNGEWÖHNLICH KALTEN STELLE IM CMB. DIESER KÖNNTE UNSERE VORSTELLUNG VOM URKNALL IN FRAGE STELLEN, ODER ABER SCHLICHT NUR EINEM UNBEDEUTENDER ZUFALL ENTSPRUNGEN SEIN.

Impressum

STORY: TORSTEN ENSSLIN & JOJO ENSSLIN
ILLUSTRATION: JOJO ENSSLIN
WISSENSCHAFT: TORSTEN ENSSLIN

KOORDINATION & BERATUNG: MONA CLERICO, PRESSESPRECHERIN MPA UND MPE
KONZEPT: JOJO ENSSLIN & TORSTEN ENSSLIN & MONA CLERICO, PRESSESPRECHERIN MPA UND MPE
ÜBERSETZUNG: KATE O'SHEA & CORNELIA RICKL
FINANZIERUNG: MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR ASTROPHYSIK GARCHING

DANK AN: LARS BEEKMANN, BENEDETTA CIARDI, MONA FROMMERT, REINHARD GENZEL, NORBERT GRÜNER, THOMAS JANKA, DANIEL KUHN, EWALD MÜLLER, WOLFGANG HILLEBRANDT, BERIT UHLMANN, DASHA RYCHKOVA

© 2009 JOJO ENSSLIN