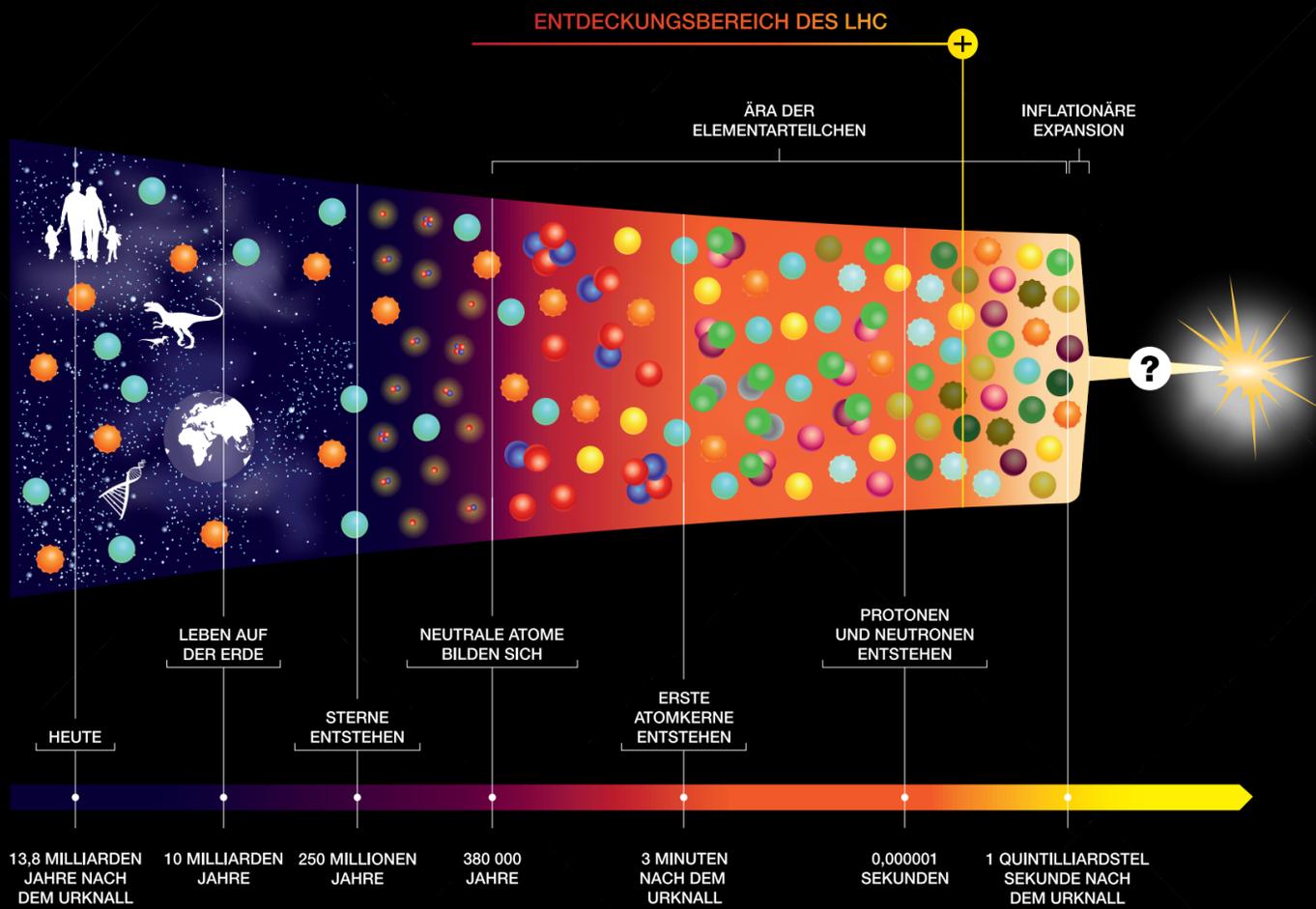


# DER URSPRUNG DES UNIVERSUMS

DIE TEILCHENPHYSIK IST DER SCHLÜSSEL ZUM VERSTÄNDNIS  
DER ALLERERSTEN AUGENBLICKE SEINER EXISTENZ.



## ZURÜCK ZUM ANBEGINN DER WELT

Ausgehend von unserem Sonnensystem haben wir die Welt der Galaxien bis an den Rand des sichtbaren Universums erforscht. Die Grenze des beobachtbaren Universums ist die 380 000 Jahre nach dem Urknall entstandene kosmische Hintergrundstrahlung. Davor verbirgt sich das Zeitalter der Elementarteilchen.

Teilchenphysikexperimente haben das Ziel, Prozesse kurz nach dem Urknall zu erforschen. Zu dieser Zeit hatten alle Materieteilchen hohe Bewegungsenergie und kollidierten dank der hohen Dichte ständig miteinander. Ähnliches passiert in den Kollisionen im LHC-Beschleuniger, jedoch mit weniger Teilchen, auf kleinem Raum und nur für kurze Zeit. So hilft die Teilchenphysik, die Geburt unseres Universums besser zu verstehen, und liefert Antworten auf grundlegende Fragen, die vielleicht zu einer gänzlich neuen Beschreibung der Natur führen werden.



### ELEMENTARTEILCHEN DES UNIVERSUMS

- QUARK
- ELEKTRON
- MYON, TAUON
- GLUON
- W-, Z-BOSON
- PHOTON
- NEUTRINO
- MESON
- BARYON
- ATOMKERN
- ATOM

### UNENDLICHES WELTALL?

Der Blick hinaus in den Kosmos ist zugleich ein Weg zurück in die Vergangenheit. Mit unseren Teleskopen können wir die 13,8 Milliarden Jahre dauernde Geschichte des Universums erforschen. Ausgehend von unserer kosmischen Heimat, der Erde, haben wir die Milchstraße mit ihren etwa hundert Milliarden Sternen immer besser kennengelernt und die Welt der Galaxien bis an den sprichwörtlichen Rand des Universums erforscht.

### HEIMAT IM ALL

Erst seit wenigen Jahrzehnten können wir unsere Erde in ihrer Schönheit, aber auch Einsamkeit aus der Ferne betrachten. 134 Kilometer über der Mondoberfläche kreisend, hält die Mondsonde Lunar Reconnaissance Orbiter einen „Erduntergang“ fest. Bestimmt durch die Entwicklung unserer Sonne, gibt es irdisches Leben seit gut 3 Milliarden Jahren. Eine weitere Milliarde Jahre wird vergehen, bis die ansteigende Leuchtkraft der Sonne diesem ein feuriges Ende bereiten wird. Unser kleiner, durchschnittlicher „Stern“ hat dem Leben auf der Erde damit eine gute, relativ lange Chance gegeben.



HEUTE  
13,8 MILLIARDEN  
JAHRE NACH DEM  
URKNALL

### DER STERNHAUFEN M7

Sterne werden nicht einzeln, sondern zu Tausenden aus Gas- und Staubwolken geboren. Obwohl die „Sternengeschwister“ gleichzeitig entstanden, unterscheiden sie sich sehr stark in ihrer Masse. Schwere, kurzlebige Sterne teilen sich den Geburtsort mit kleinen, langlebigen Sternen wie unserer Sonne. Der ca. 200 Millionen Jahre alte Sternhaufen M7 hat schon einen Milchstraßenumlauf hinter sich. Nach kosmischen Maßstäben wird er nicht mehr lang existieren, sondern die Sterne bald einzeln auf ihren Lebensweg entlassen. Auch unsere Sonne war vor 4,6 Milliarden Jahren Teil eines solchen Sternhaufens und zieht nun einsam ihre Bahn.



### STERNENTSTEHUNG IM ADLERNEBEL

Sterne entstehen aus riesigen Gas- und Staubwolken, die sich durch ihre Schwerkraft zusammenziehen und in kleinere Fragmente aufteilen. In den dichtesten Regionen kollabieren Protosterne und erhitzen sich dabei. Schließlich wird die Kernfusion von Wasserstoff zu Helium gezündet. Diese Fusion ist die wesentliche Energiequelle der Sterne. Sternengeburten finden meist im Verborgenen von dichten Staubwolken statt, zum Beispiel in den dunklen „Säulen der Schöpfung“ im Adlernebel. Auch unsere Sonne und ihre „Sternengeschwister“ haben sich einst aus ihren Gas- und Staubwolken lösen müssen.



9,1 MILLIARDEN JAHRE

### DER PLANETARISCHE NEBEL MESSIER 57

Nichts währt ewig, auch Sterne nicht. Geht der Fusions-treibstoff Wasserstoff im Inneren zu Ende, kann die Bildung von schwereren chemischen Elementen das Sternenleben noch verlängern. Letztlich wird der Stern instabil, bläht sich riesenhaft auf, beginnt zu pulsieren und gibt einen Großteil seiner Masse an die Umgebung ab. Ein wunderschöner Planetarischer Nebel wie hier Messier 57 leuchtet für kurze Zeit auf. Übrig bleibt ein langsam auskühlender Weißer Zwerg. Die in den letzten Lebensphasen erzeugten und verteilten, schwereren chemischen Elemente sind Grundlage für die Entstehung von Planeten oder vielleicht sogar von Leben in Sternensystemen der nächsten Generation. Auch unser Sonnensystem profitierte am Anfang so von früheren Sternengenerationen.



8,5 MILLIARDEN JAHRE

9,25 MILLIARDEN JAHRE

## EIN ZWILLING UNSERER MILCHSTRASSE

Galaxien sind die mittelgroßen Bausteine unseres Universums. Sie bestehen oft aus vielen hundert Milliarden von Sternen und weisen eine Vielzahl an Erscheinungsformen auf. Die Milchstraße ist wie Messier 83 eine Balkenspiralgalaxie und bildete sich vor fast 9 Milliarden Jahren in einem Galaxienhaufen. Fotografien zeigen nur leuchtende Materie wie Sterne, Gas- und Staubnebel. Ein großer Teil der Galaxienmasse bleibt darauf unsichtbar – die sogenannte „Dunkle Materie“.



## SUPERNOVA EXPLOSIONS- WOLKE MESSIER 1

Die spektakulärste Form des Sternentodes ist die Explosion als Supernova. Im Jahr 1054 leuchtete eine Supernova für Wochen so hell wie alle Sterne unserer Milchstraße zusammen. Die Explosionswolke Messier 1 zeugt noch heute von diesem gewaltigen Ereignis. Nur manche Doppelsternsysteme und Sterne, die viel schwerer sind als unsere Sonne, enden als Supernova. Von ihnen bleibt letztlich nur ein ultradichter Neutronenstern oder gar ein Schwarzes Loch übrig. Supernova-Explosionen verdichten Gaswolken in ihrer Umgebung und reichern sie mit schweren chemischen Elementen an. So entstand vermutlich auch unser Sonnensystem.



8 MILLIARDEN JAHRE

## GALAXIENHAUFEN ALS VERGRÖßERUNGSGLAS

Die größten Bausteine des Universums sind Galaxienhaufen. Ihre Verteilung im Universum hängt eng mit der Verteilung der Materie kurz nach dem Urknall zusammen. Schwere Massen können Licht ablenken. Massereiche Galaxienhaufen wie MACSJ0717 können Lichtstrahlen von Objekten, die hinter ihnen liegen, bündeln und wirken für uns somit wie ein Vergrößerungsglas. Diese sogenannten Gravitationslinsen lassen uns auf noch viel weiter entfernte Galaxien blicken, deren Licht bereits 12 Milliarden Jahre lang zu uns unterwegs ist. Die länglichen Bögen und Striche im Teleskopbild sind die stark vergrößerten und verzerrten Bilder solcher Galaxien.



1,8 MILLIARDEN JAHRE

## TIEFER BLICK ZURÜCK IN DIE VERGANGENHEIT

Einer der tiefsten Blicke hinaus ins Weltall und damit zurück in der Zeit ist das Hubble Ultra Deep Field – eine Himmelsregion, aufgenommen vom Hubble-Teleskop. Die kleinen roten Pünktchen sind einige der am weitesten entfernten Galaxien. Sie sind bereits 800 Millionen Jahre nach dem Urknall entstanden; ihr Licht ist seit etwa 13 Milliarden Jahren zu uns unterwegs. Die ältesten beobachteten „roten Pünktchen“ und somit Galaxien unseres Universums sind etwa 13,4 Milliarden Jahre alt. Vor der Entstehung dieser ersten Sterne und Galaxien herrschte hunderte Millionen Jahre lang Finsternis.

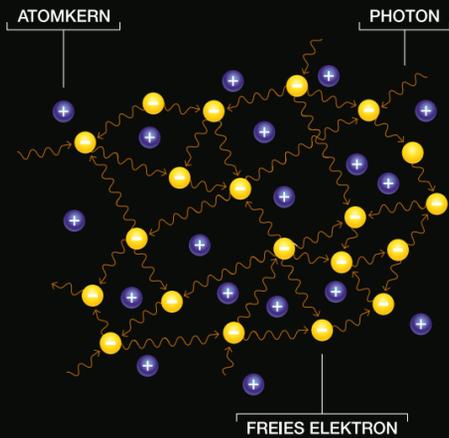


800 MILLIONEN JAHRE

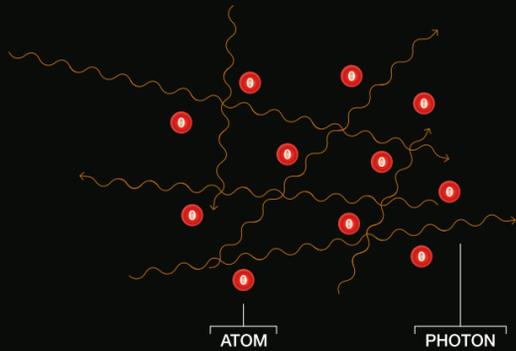
5 MILLIARDEN JAHRE

## DAS "NACHGLÜHEN" DES URKNALLS UND DIE ENTSTEHUNG DER ERSTEN NEUTRALEN ATOME

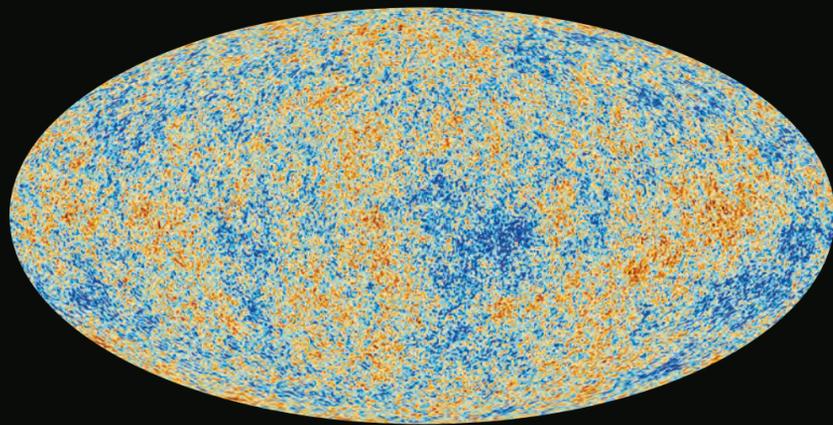
### DAS UNIVERSUM WIRD DURCHSICHTIG



Das frühe Universum konnte von den Photonen nicht ungehindert durchquert werden. Ständig stießen sie mit elektrisch geladenen Teilchen (freie Elektronen und Atomkerne) zusammen. Etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall war das Universum dann so stark abgekühlt, dass sich stabile Atome (etwa das Wasserstoffatom) bilden konnten.



Die stabilen Atome bildeten kein Hindernis mehr für die Photonen, die seitdem durch das Universum reisen. Aus ihnen besteht die kosmische Hintergrundstrahlung. Sie entstand an jedem Punkt des Universums und hat sich in alle Richtungen gleichförmig ausgebreitet. Das Universum wurde elektrisch neutral und damit durchsichtig.



Diese von der Planck-Raumsonde vermessene Himmelskarte zeigt geringfügige Schwankungen der Hintergrundstrahlung im Bereich von  $\pm 50$  Millionstel um den Mittelwert.

### DIE KOSMISCHE HINTERGRUNDSTRAHLUNG

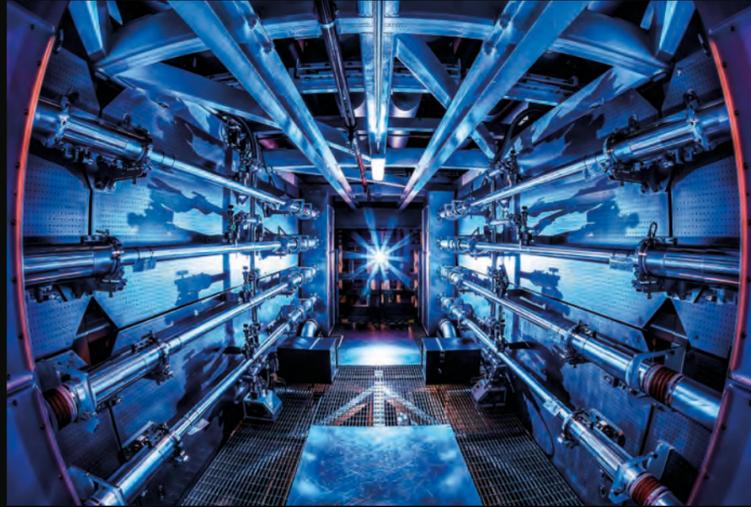
Die kosmische Hintergrundstrahlung ist die älteste Strahlung unseres Universums. Sie entstand 380 000 Jahre nach dem Urknall und ist seit 13,8 Milliarden Jahren zur Erde unterwegs. Sie stammt aus der Zeit, als das Universum fast perfekt homogen war – ähnlich der Oberfläche eines Sees bei Windstille. Die hellen und dunklen Bereiche zeigen geringfügige Schwankungen. Aus diesen Schwankungen entstanden die heutigen Sterne und Galaxien. Die kosmische Hintergrundstrahlung ist der direkte Nachweis für die Richtigkeit der Urknalltheorie.

380 000 JAHRE  
NACH DEM URKNALL

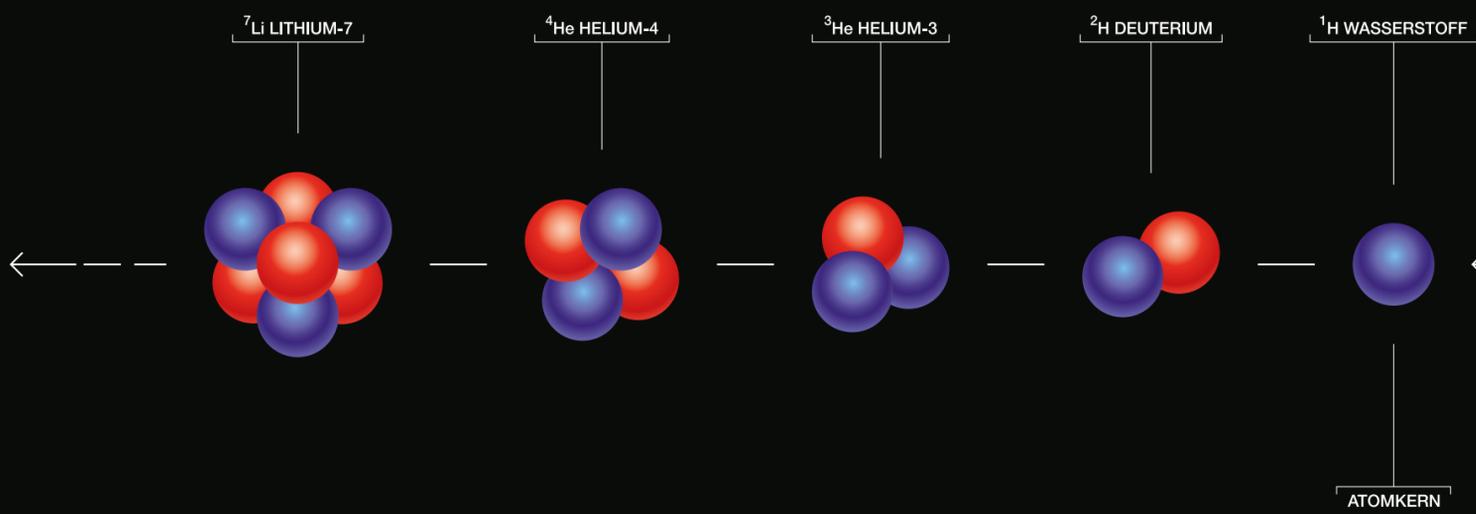
## DIE GEBURTSSTUNDE DER CHEMIE

### PROTONEN UND NEUTRONEN VERBINDEN SICH ZU ATOMKERNEN

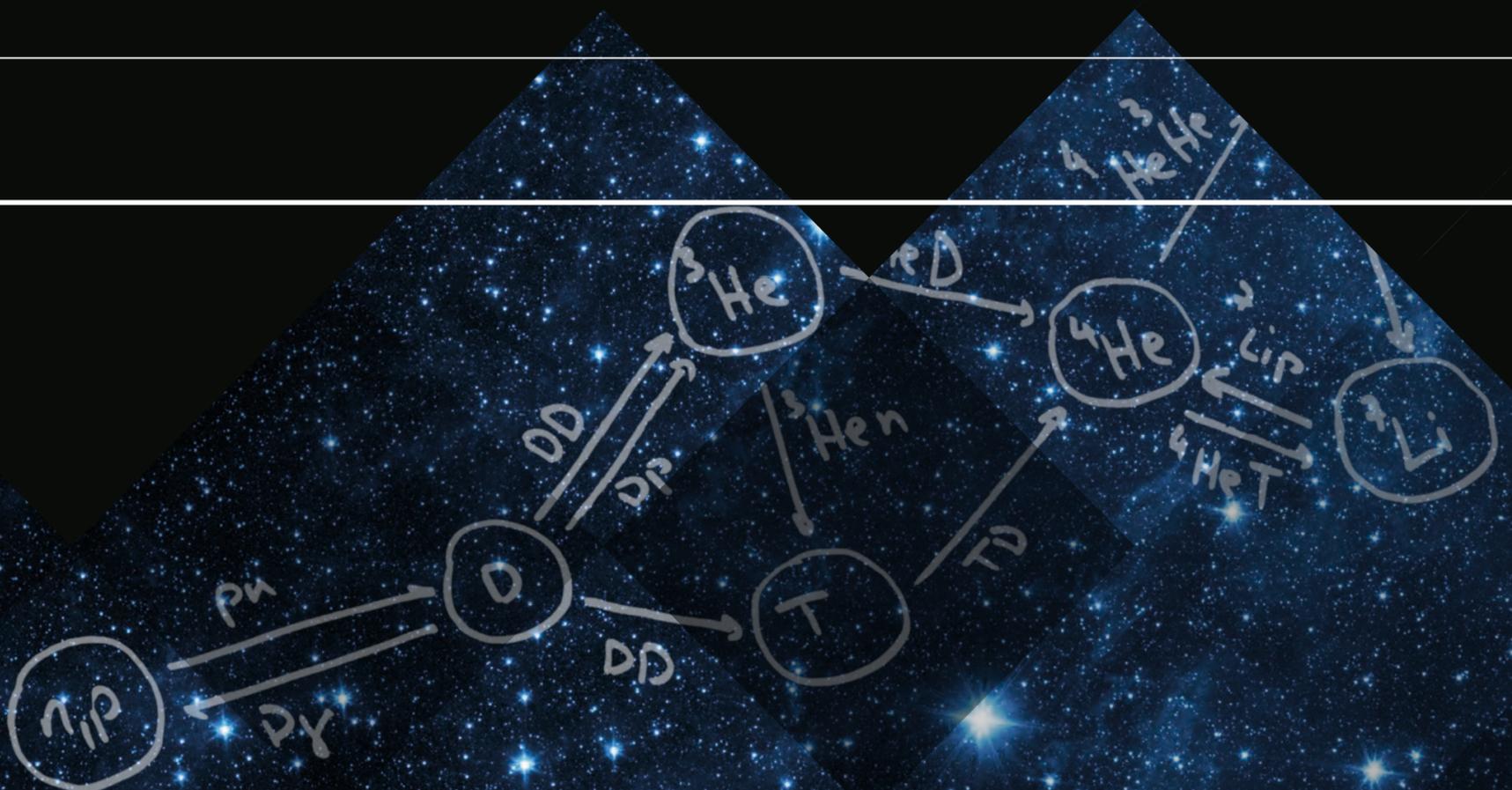
Während sich Atomkerne im Labor nur unter größtem technischen Aufwand vereinen lassen, herrschten Sekunden nach dem Urknall im gesamten Universum Temperaturen von mehreren Milliarden Grad. Unter diesen extremen Bedingungen fusionierten Protonen und Neutronen zu den ersten stabilen Atomkernen. Und zwar zu den leichtesten Elementen im Periodensystem: Wasserstoff, Helium und Spuren von Lithium.



Fusion von Wasserstoffisotopen in Labor; Lawrence Livermore National Laboratory, USA



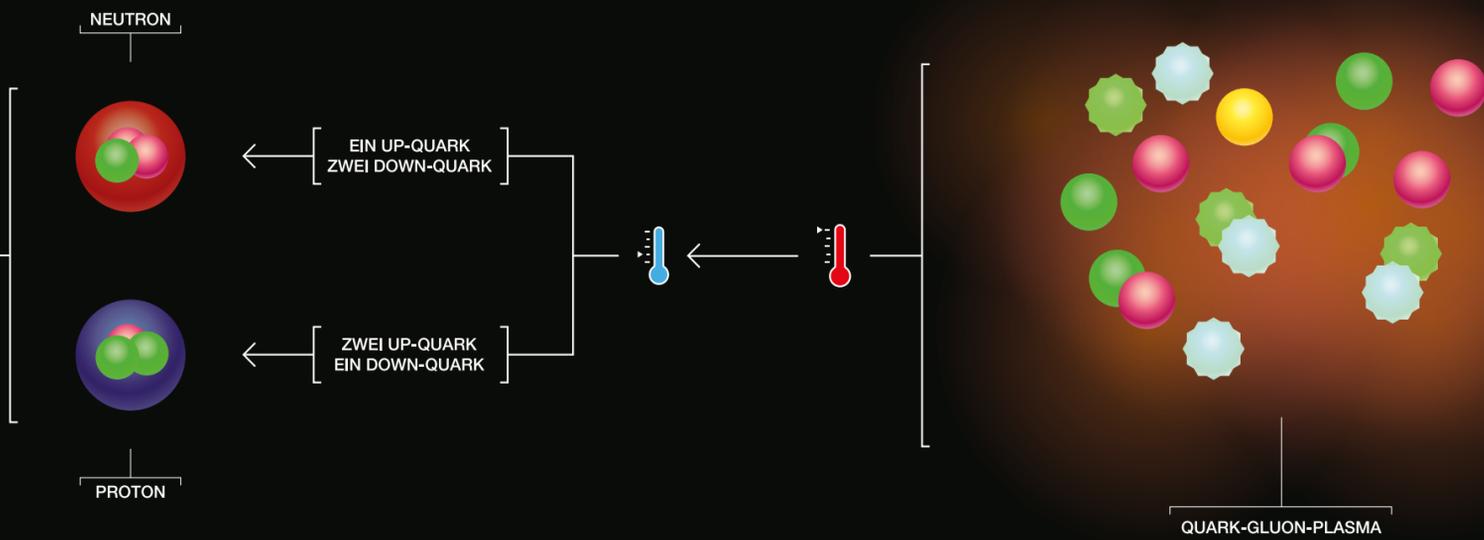
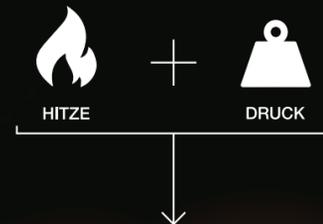
3 MINUTEN NACH DEM URKNALL



## DIE BAUSTEINE DER ATOMKERNE

### PROTONEN UND NEUTRONEN ENTSTEHEN

Wie die Perlen von Wasser auf einer kalten Oberfläche, kondensieren mit fallender Temperatur freie Quarks und Gluonen zu Protonen und Neutronen sowie deren Antiteilchen. Die Natur der Teilchen ändert sich schlagartig. Nach der Kondensation annihilieren sich die zahlreich vorhandenen Teilchen-Antiteilchen-Paare gegenseitig. Übrig bleibt ein kleiner Überschuss an Protonen und Neutronen, den Bausteinen, aus denen Sekunden später die ersten Elemente entstehen werden.



QUARK-GLUON-PLASMA

Freie Quarks und Gluonen bilden das sogenannte Quark-Gluon-Plasma. Diese subatomaren Teilchen können wir heute nicht mehr "frei" beobachten, da sie sich zu Protonen und Neutronen vereint haben. Unmittelbar nach dieser Kondensation beträgt die Dichte und Temperatur der Ursuppe 100 kg/cm<sup>3</sup> und 1000 Milliarden Grad.

0,000001 SEKUNDEN  
NACH DEM URKNALL

# DIE BÜHNE FÜR DAS KOMMENDE ZEITALTER DER ELEMENTARTEILCHEN

## DER URKNALL

Der Urknall, früher eine philosophische Hypothese, ist heute eine unbestrittene Tatsache in der Wissenschaft. Selbst wenn es noch keine gesicherte Theorie zum „Wie“ des Ursprungs gibt, wissen wir, dass sich das Universum einst in einem Zustand extremer Dichte und Temperatur befand.

Astronomische Beobachtungen von entfernten Galaxien zeigen, dass sich das Universum immer weiter ausdehnt: Objekte im Universum entfernen sich umso schneller voneinander, je größer ihre Abstände sind. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass das Universum früher kleiner war und vor endlicher Zeit entstand, nach unseren Berechnungen vor 13,8 Milliarden Jahren.

## INFLATION – EIN MÖGLICHER START DES UNIVERSUMS

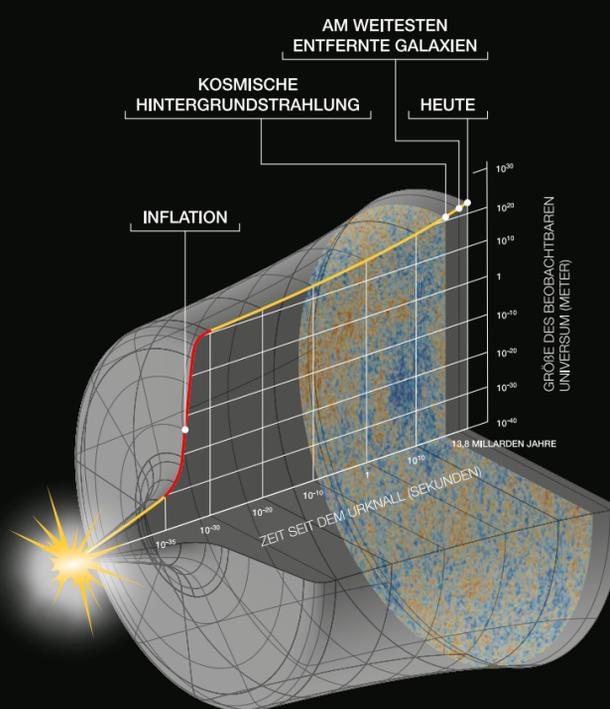
Die hochgradige Homogenität der Galaxienverteilung und die Gleichmäßigkeit der kosmischen Hintergrundstrahlung sind durch eine Standard-Expansion des Universums nicht zu erklären. Man nimmt an, dass das allerfrüheste Universum eine Phase räumlicher exponentieller Expansion durchlaufen hat. Alle Bereiche des heute sichtbaren Kosmos standen vor dieser Inflation bereits vorübergehend in Wechselwirkung. Hinweis auf eine inflationäre Phase liefert außerdem die Tatsache, dass es keine feststellbare Krümmung des Raumes gibt – das Universum ist „flach“.

In unserer Alltagserfahrung wirkt Gravitation immer anziehend. Auf kosmischen Skalen kann als Lösung der Einsteinschen Theorie auch der umgekehrte Effekt eintreten: das Universum expandiert und zwar beschleunigt. Forscherinnen und Forscher vermuten, dass dies der Startschuss unseres Universums war. Einen ähnlichen Effekt beobachten wir übrigens gerade jetzt: 13,8 Milliarden Jahre nach dem Urknall dehnt sich das Universum wieder beschleunigt aus (Nobelpreis 2011 an Adam Riess, Brian P. Schmidt und Saul Perlmutter).

Ursache der frühen Inflation kann die potentielle Energie eines hypothetischen neuen Quantenfeldes gewesen sein. Nach der Inflation ist das Universum – bis auf das Quantenfeld – komplett ausgedünnt und leer. Die durch den Teilchenzerfall freiwerdende Energie bewirkt, dass sich das Universum von selbst mit allen Teilchensorten füllt. Es beginnt das strahlungsdominierte Universum und damit die Standardgeschichte der Kosmologie.



Mit speziellen Teleskopen sucht man in der kosmischen Hintergrundstrahlung nach den Spuren einer inflationären Phase.



1 QUINTILLIARDSTEL SEKUNDE NACH DEM URKNALL

URKNALL

