

[Freiraum für Persönlichkeit]

SanktAfra 

Sächsisches Landesgymnasium  
Hochbegabtenförderung

# Wahlgrundkurs Evolution



# Wahlgrundkurs Evolution

1. Konzeption des Kurses
2. Physik-Teil: Kosmologie  
(Urknalltheorie, Sterne & Galaxien, Leben im Weltall, Ende des Universums)
3. Rezeption



# 1 Konzeption und Überblick

- in der gymnasialen Oberstufe (zusätzlich) wählbarer Kurs in Sankt Afra, z.B.: Astronomie, Darstellendes Spiel, Fremdsprache (Italienisch)
- keine Abiturprüfung
- viersemestriger Kurs in organisatorisch getrennten Einheiten, 2 Wochenstunden (1 Doppelstunde 90 min)
- fachübergreifendes Thema Evolution
- Sem1: Entwicklung des Universums (Physik)  
Sem2: Geomorphologie (Geographie)  
Sem3: Evolution der biologischen Vielfalt (Biologie)  
Sem4: Evolution des Menschen (Biologie)

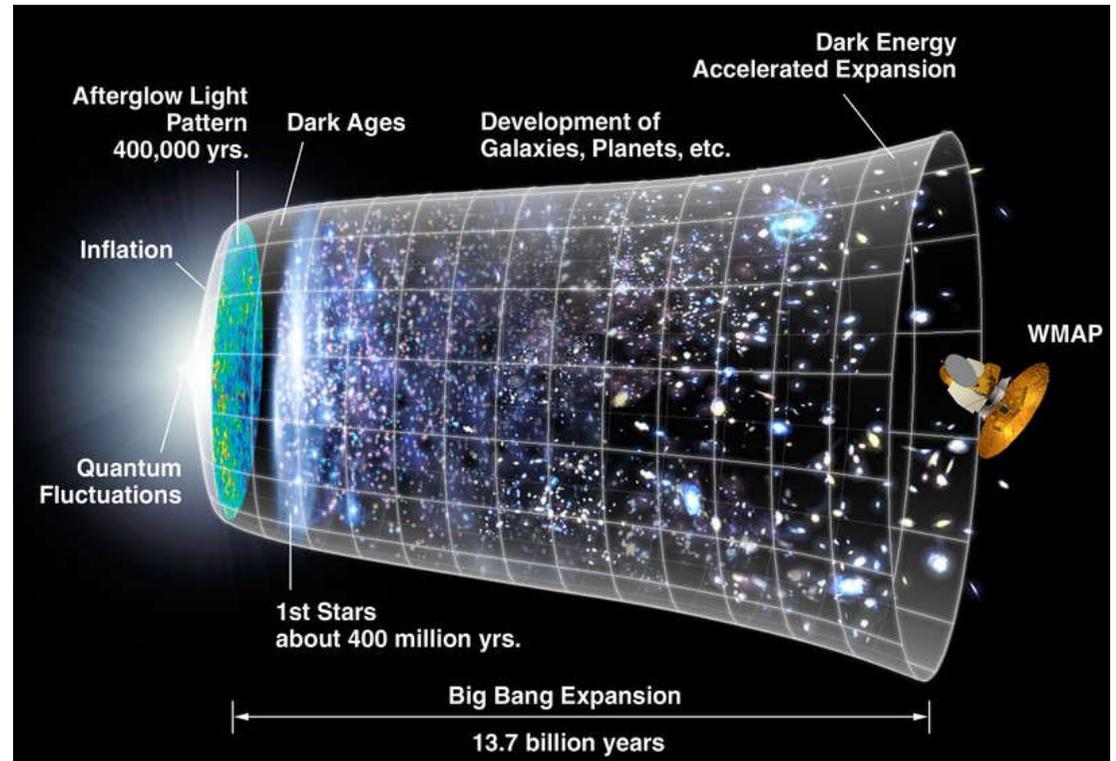


## 2 Entwicklung des Universums

Lehrplan 26 Stunden (~ 13 Wochen):

zeitliche Gliederung (in „etwas freier Adaption“ des Lehrplans (s. Anhang)

- I. Theorie des Urknalls
- II. Sterne und Galaxien
- III. Planeten und Leben
- IV. Ende des Universums



Quelle: <https://www.flickr.com/photos/nasablueshift/7> CC BY 2.0

05.12.2024



## 2 - I. Theorie des Urknalls

Beobachtungsergebnisse und Theorien zur Entstehung des Universums

- kosmologisches Prinzip (Weltall ist homogen und isotrop)  
Beobachtung auf großen Skalen  
kosmische Hintergrundstrahlung
  - Olbers-Paradoxon
  - Elementverteilung im Universum
  - Expansion: spektrale Rotverschiebung und Hubble-Konstante
  - Alter der ältesten Sterne
- Urknalltheorie: Theorie, die am besten mit den Beobachtungsergebnissen übereinstimmt



## 2 - I. Theorie des Urknalls

### Frühes Universum

- Begriffserarbeitung

Was ist der Urknall? Gab es eine Zeit vor dem Urknall? Was sind die vier Wechselwirkungen? Was ist Schwarzkörperstrahlung?

(z.B. in Gruppenarbeit mit Videos: „Harald Lesch -  $\alpha$ Centauri“:

<https://www.br.de/fernsehen/ard-alpha/sendungen/alpha-centauri/index.html>)

- Frühes Universum  $\leftrightarrow$  Teilchenphysik

→ Eine Einführung in die Teilchenphysik

- Arbeit mit dem Heft: „Teilchenphysik“ des Netzwerks Teilchenwelt

z.B. hier: [https://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Netzwerk\\_Teilchenwelt/material/Band1\\_UnterrichtsmaterialTP\\_2018.pdf](https://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/material/Band1_UnterrichtsmaterialTP_2018.pdf)

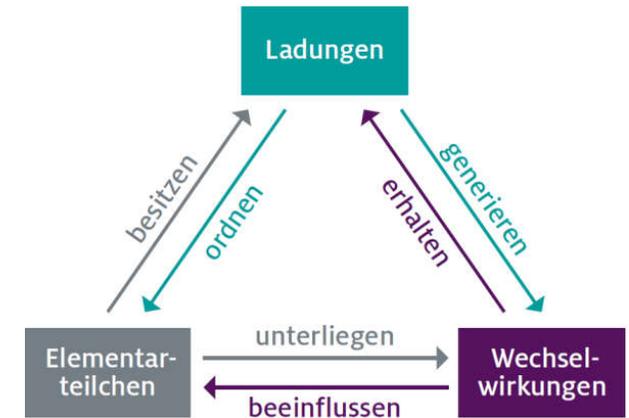


## 2 - I. Theorie des Urknalls

### Einführung Teilchenphysik

Quelle: Heft Teilchenphysik, s.o.

- „Dreieck“  
Ladung – Elementarteilchen – Wechselwirkung
- Elementarteilchen: Standardmodell  
(Quarks und Leptonen, Ladungen)
- Wechselwirkungen  
(Modell der Wechselwirkung, Austauschpartikel, Reichweite)
- Higgs-Mechanismus



## 2 - I. Theorie des Urknalls

z.B. Klausuraufgabe:

Entsprechend dem Standardmodell der Teilchenphysik gehen wir von grundlegenden Wechselwirkungen (Kräften) aus, die zwischen allen Teilchen der Materie wirken können.

- a) Nennen Sie die grundlegenden Wechselwirkungen.
- b) Beschreiben Sie kurz, wie wir uns den Mechanismus einer solchen Wechselwirkung prinzipiell vorstellen müssen. Gehen Sie dabei auch auf die Ladungserhaltung ein.
- c) Erklären Sie, was man unter dunkler Materie versteht und warum es Grund zur Annahme für ihre Existenz gibt.



## 2 - I. Theorie des Urknalls

### Strahlungsdominiertes und Materiedominiertes (frühes) Universum

Zeit	Temperatur	Dichte	Ereignis	Bemerkungen
$10^{-43}$ s	$10^{32}$ K	$10^{94}$ g/cm <sup>3</sup>	„Urbrei“ aus: Higgs-Bosonen, Photonen, Neutrinos, Elektronen, Gluonen und Quarks, alle 4 Grundkräfte vereint, ständige Umwandlungen von Materie und Energie ( $E = mc^2$ ), kein thermisches Gleichgewicht, Symmetriebrechungen	Planck-Zeit
$10^{-36}$ s	$10^{27}$ K		Exponentielles Aufblähen des Universums, gleichmäßige Verteilung der Materie, Abspaltung der starken Wechselwirkung von den anderen Kräften	Inflationäre Phase
$10^{-33}$ s	$10^{25}$ K		Bildung von Quarks (Bestandteile von Proton und Neutron), Aussterben der Higgs-Bosonen	Quark-Ära
$10^{-12}$ s	$10^{16}$ K		Abspaltung der schwachen WW, Bildung von Hadronen (Protonen, Neutron)	
$10^{-4}$ s	$10^{12}$ K	$10^{13}$ g/cm <sup>3</sup>	Vernichtung von Protonen und Neutronen mit ihren Anti-Teilchen (Überschuss: heutige Hadronen)	Hadronen-Ära
1 s	$10^{10}$ K		Vernichtung von Elektronen und Positronen (Überschuss: heutige Elektronen)	Leptonen-Ära
10 s	$< 10^9$ K		Bildung leichter Atomkerne: p und 25% <sup>4</sup> He (+ <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, Li, Be)	
300 s	$10^8$ K		Nukleosynthese leichter Kerne kommt zum Erliegen	
$3 \cdot 10^{11}$ s (10.000 a)	$10^5$ K		Materienteil übertrifft den Strahlungsanteil	Materie-Ära
$10^{13}$ s (400.000 a)	4000 K		Entkopplung Materie-Strahlung, Universum wird „durchsichtig“, $p+e \rightarrow ^1\text{H}$	



## 2 - I. Theorie des Urknalls

### Strahlungsdominiertes Universum

(Vgl.: [Alexander Bett, „Temperaturentwicklung des Universums“](#))

- Ansatz „Plancksches Strahlungsgesetz“

$$\text{Energiedichte: } \varepsilon \sim T^4$$

- kosmischer Skalenfaktor  $S$ :  $S^3 \sim V$

- Rotverschiebung:  $S \sim \lambda$  und  $\varepsilon \sim T^4$

$$\text{führt zu: } S \sim \frac{1}{T}$$

- ART und Friedmann-Gleichung (ohne Herleitung):  $t \sim \frac{1}{T^2}$

ermöglicht z.B. eine Abschätzung für die Energie  $E$  des Universums im

$$\text{Alter } t : E = \frac{1 \text{ MeV}}{\sqrt{t}} \text{ mit } t \text{ in s}$$



## 2 - I. Theorie des Urknalls

### Materiedominiertes Universum

(Vgl.: [Alexander Bett, „Temperaturentwicklung des Universums“](#))

- Ansatz „Ideales Gas“ und adiabatische Ausdehnung des Weltalls:

$$S \sim T^{-\frac{1}{2}}$$

- Energiedichte:  $\varepsilon \sim T^{\frac{3}{2}}$

- ART und Friedmann-Gleichung:  $t \sim T^{-\frac{3}{4}}$



## 2 - I. Theorie des Urknalls

Zusammenfassung:

<i>Alter des Universums</i>	$t < 10^{11} s \approx 10.000 a$	$t > 10^{11} s \approx 10.000 a$ <i>(bis heute)</i>
	Strahlungs dominiertes Universum	Materie
Energiedichte $\epsilon$	$\epsilon \sim T^4$	$\epsilon \sim T^{\frac{3}{2}}$
Ausdehnung $S$	$S \sim T^{-1}$	$S \sim T^{-\frac{1}{2}}$
Zeit $t$	$t \sim T^{-2}$	$t \sim T^{-\frac{3}{4}}$



## 2 - I. Theorie des Urknalls

z.B. Klausuraufgabe:

Das sehr frühe Universum lässt sich modellhaft als „strahlungsdominiert“ beschreiben.

a) Erläutern Sie kurz, was mit „strahlungsdominiert“ (im Vergleich zu „materiedominiert“) gemeint ist.

Nach etwa  $10^{-36}$  s herrschte im Universum eine Temperatur von etwa  $10^{27}$  K.

b) Berechnen Sie die Temperatur, die das Universum im Alter von 1 s (näherungsweise) hat.

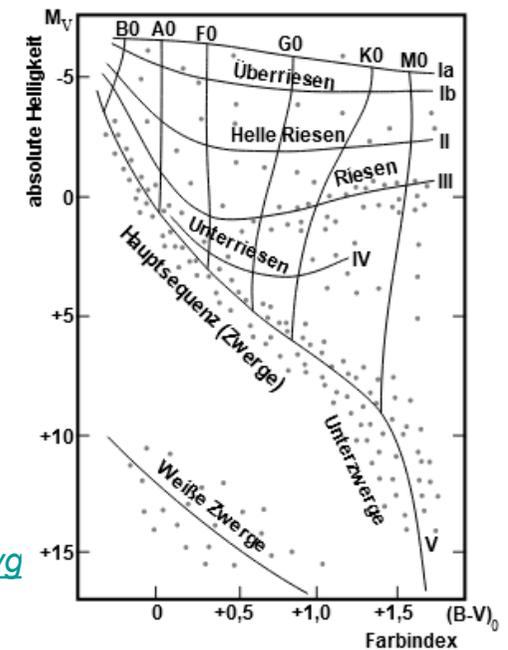
c) Um welchen Faktor hat sich das Universum in diesem Zeitraum ausgedehnt?



## 2 - II. Sterne & Zustandsgrößen

- Masse, Radius, Volumen und Dichte
- Temperatur und Spektralklassen (Vgl.: Plancksches Gesetz)
- scheinbare und absolute Helligkeit:  
 $m - M = 5 \cdot \lg(r) - 5$  ( $r...$  Entfernung in pc)
- Leuchtkraft, Masse-Leuchtkraft-Beziehung:  
 $L \sim m^{\frac{7}{2}}$
- Hertzsprung-Russel-Diagramm

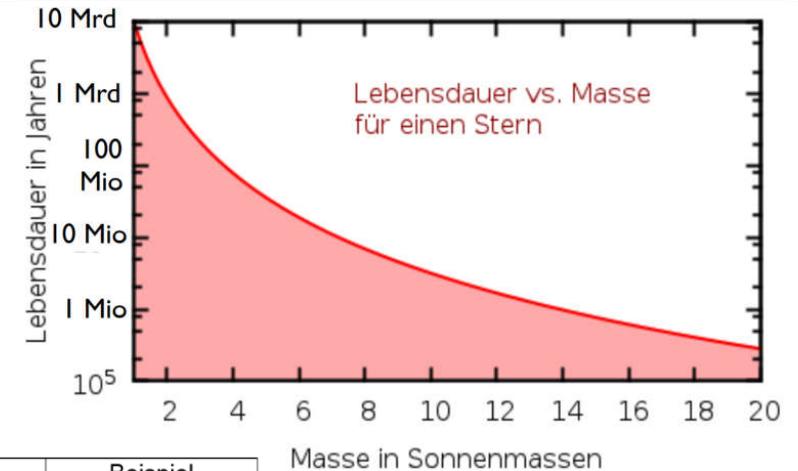
Quelle: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Farbenhelligkeitsdiagramm.svg>  
CC 3.0



## 2 - II. Sterne & Galaxien

### - Sternentwicklung

Quelle: <https://scilogs.spektrum.de/relativ-einfach/astonomisches-grundwissen-5/>



### - Sterntypen

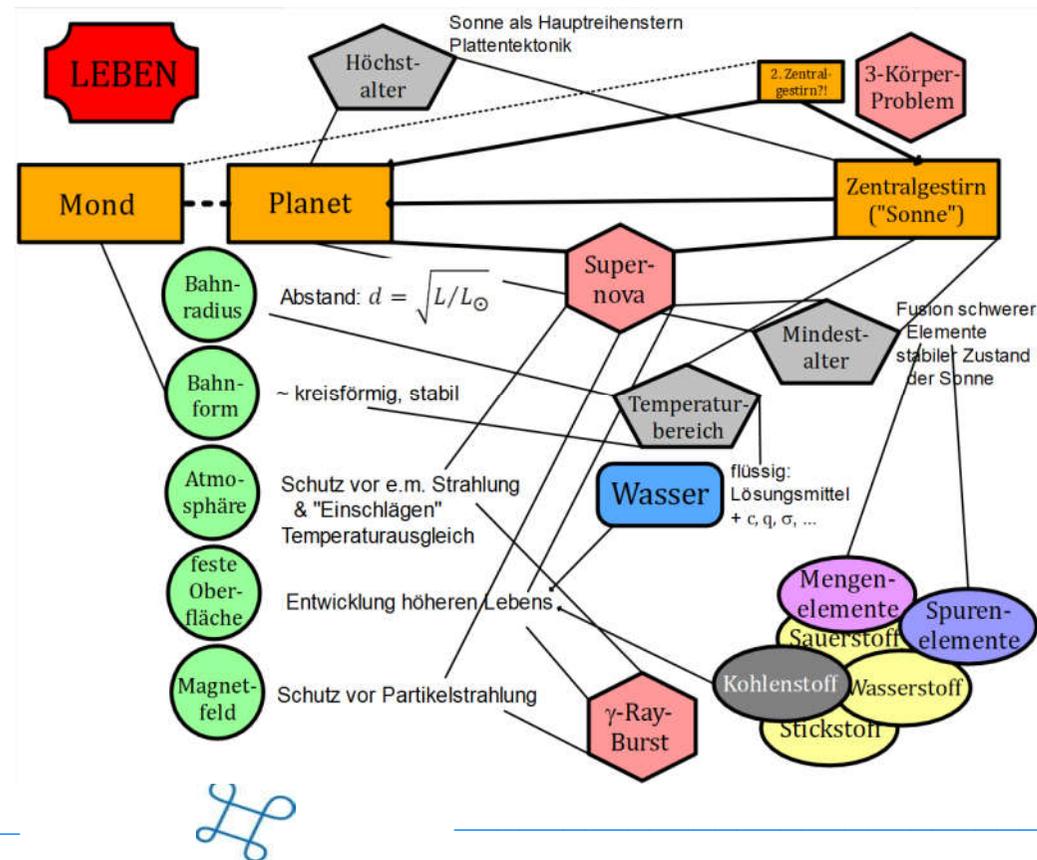
Name	Beschreibung	Beispiel
Brauner Zwerg	keine richtigen Sterne, da keine Wasserstoff-Fusion, aber u.U. Lithium-Fusion, massereicher als planetare Gasriesen aber masseärmer als „Rote Zwerge“	54 Piscium, 15 Sagittae, Epsilon-Indi
Roter Zwerg	kleinste Sterne, bei denen Wasserstoff-Fusion möglich ist, ca. 0,1fache bis 0,6fache Sonnenmasse, Sonderform des „Weißen Zwergs“	Gliese 581, Proxima Centauri, Barnards Pfeilstern
Weißer Zwerg	Stern mit kleiner Leuchtkraft trotz hoher Temperatur, hohe Dichte, Endstadium eines relativ massearmen Sterns von weniger als ca. 1,5fache Sonnenmasse	Prokyon B, Sirius B, Van Maanens Stern
Schwarzer Zwerg	Erkalteter „Weißer Zwerg“, hypothetisches Spätstadium in der Sternentwicklung für massearme Sterne (< 10 Sonnenmassen)	<i>Universum ist noch nicht alt genug</i>
Roter Riese	Stern großer Ausdehnung und großer Leuchtkraft bei relativ niedriger Temperatur, Stadium häufig gegen Ende der Entwicklung eines sonnenähnlichen, relativ massearmen Sterns	Aldebaran (α Tau), Arktur (α Boo)

### - Galaxien



## 2 - III. Planeten und Leben

- Merkmale für Leben (Bewegung, Wachstum, Reizbarkeit, Fortpflanzung und Vererbung, Stoffwechsel und Energieaustausch, Selbstregulation)
- Mindmap „Leben“



## 2 - III. Planeten und Leben

- Fermi-Paradoxon („Where is Everybody?“)  
z.B. in Gruppenarbeit: Lösungen für das FP finden
- Drake-Gleichung und Abschätzungen  
$$N = R_* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$$
- Exoplaneten
- SETI-Programm



## 2 - IV. Ende des Universums

- (weitere) Expansion des Universums
- Krümmung des Universums und kosmologische Konstante  $\Lambda \gtrless 0$   
bzw. Dichteparameter  $\Omega \gtrless 1$   
→ „Unser Universum ist flach“?!
- Diskussion verschiedener Szenarien  
(Vgl. z.B.: „Die Wissenschaft vom Weltuntergang“  
in: *Spektrum der Wissenschaft* 05/2011)

Zeit	Ereignis
$14 \cdot 10^9$ a	heutiges Universum
$20 \cdot 10^9$ a	Ende unserer Sonne (Roter Riese → Weißer Zwerg → Schwarzer Zwerg)
$10^{12}$ a	letzte Sterne verlöschen, das Universum wird dunkel
$10^{16}$ a	tote Sterne verlieren ihre Planeten
$10^{19}$ a	Galaxien aufgelöst, Kerne zu supermassereichen Schwarzen Löchern kollabiert
$10^{20}$ a	letzte Planeten stürzen in erloschene Muttersterne
$10^{33}$ a	Protonen zerfallen, letzte Sterne glimmen nochmals auf
$10^{46}$ a	letzte Protonen kollabieren und zerstrahlen
$10^{65}$ a	stellare Schwarze Löcher verdampfen
$10^{100}$ a	Supermassereiche Schwarze Löcher detonieren
$10^{1500}$ a	Materie verwandelt sich in Eisenkugeln
$10^{10^{26}}$ a	Eisenkugeln kollabieren zu Schwarzen Löchern
$10^{10^{26}+e}$ a	eschatologische Schwarze Löcher detonieren



## 3 Rezeption

- große Nähe zu Fragen der Schülerinnen („Woher kommen wir?“ „Wohin gehen wir?“)
- Nähe zur aktuellen Forschung (Teilchenphysik, jüngste Nobelpreise, Exoplaneten, Schwarze Löcher, Raumfahrt zum Mars...)
- „Theory of Knowledge“: Wissen beruht auf Beobachtung und überprüfbaren Fakten → Weltbild der Schülerinnen (Umgang mit Fakten, Aufstellen, Auseinandersetzen und Prüfen von Theorien...)
- ähnliche Ansätze wissenschaftlicher Forschung in den Natur- und Geowissenschaften
- ein Thema aus unterschiedlichen Perspektiven betrachten



## 3 Rezeption

- sehr gute Annahme und Nachfrage bei den Schülerinnen  
2 Kurse mit je ca. 10 Teilnehmerinnen  
(Sankt Afra je Jahr ca. 50 Abiturientinnen)
- kein Prüfungsdruck: entspannte Atmosphäre
- kein Zeitdruck (sowohl für Lehrerinnen als auch Schülerinnen):  
Zeit für kritisches Denken, Exkurse zu verwandten Themen  
(Cixin Liu: „Die drei Sonnen“...)
- gute Ergebnisse, Notendurchschnitt 1.Semester: 9..12 NP



Danke!

# Danke für die Aufmerksamkeit!

Für Fragen & Kontakt:

Otmar Winkler

Sächsisches Landesgymnasium  
Sankt Afra

Freiheit 13  
D-01662 Meissen

[www.sankt-afra.de](http://www.sankt-afra.de)

Email: [otmar.winkler@sankt-afra.de](mailto:otmar.winkler@sankt-afra.de)



# Anhang: Lehrplan

## Übersicht über die Lernbereiche und Zeitrichtwerte

Jahrgangsstufen 11/12

Lernbereich 1:	Entwicklung des Universums	30 Ustd.
Lernbereich 2:	Evolution der Geomorphologie	30 Ustd.
Lernbereich 3:	Evolution der biologischen Vielfalt	30 Ustd.
Lernbereich 4:	Evolution des Menschen	22 Ustd.

### Lernbereich 1: Entwicklung des Universums

**26 Stunden**

Die Schüler werden durch die Medien mit einer großen Anzahl von Meldungen konfrontiert, welche auf populärwissenschaftlichem Niveau aktuelle Forschungsergebnisse aus der Physik und der Kosmologie vermitteln. Die Schulphysik ist nicht in der Lage, eine Kommentierung und Bewertung dieser neuen Erkenntnisse durchzuführen. Es bleibt in der Regel dem Schüler selbst überlassen, diese Erkenntnisse zu verstehen und mit seinem bestehenden Weltbild in Einklang zu bringen. Dieser Lernbereich soll neue Forschungsergebnisse aus der Astronomie systematisch vorstellen und mit Erkenntnissen aus der Physik verknüpfen. Nicht zuletzt wird die Entwicklung des Universums als evolutionärer Prozess begriffen.

Die Schüler stellen ihre Gedanken in sprachlich und logisch korrekter Form dar und präsentieren ihre Ergebnisse in anschaulicher und verständlicher Weise.

Um sich ein eigenes Urteil zu bilden, setzen sie sich mit Kritiken zur Kosmologie intensiv auseinander.



# Anhang: Lehrplan

## Das Zeitalter der Urmaterie:

Die Schüler gewinnen Einblick in die Urknalltheorie

Die Schüler lernen eine neue Struktur der Physik kennen und kennen andere Zeit- und Entfernungsmaßstäbe

- Inflation, Quantengravitation
- Horizont- und Flachheitsproblem
- Expandierendes Universum
- Elementerzeugung (Kernsynthese)
- Verhältnis von Massenenergie und Strahlung
- Rekombination

Zeitskala einführen

vier Naturkräfte (Gravitation, elektromagnetische Kraft, starke Kernkraft, schwache Kernkraft) mit Beispielen aus der Physik erläutern

Grenzen der heutigen Physik

Größenskala

Bedeutung der Hintergrundstrahlung

Bedeutung E. Hubbles

dunkle Materie

Elektronen und Protonen bilden die ersten Atome



# Anhang: Lehrplan

Das Zeitalter der leuchtenden Sterne:  
Die Schüler gewinnen Einblick in die  
Sternentstehung und Galaxienbildung

- Modell zur Sternbildung
- Massereiche Sterne
- Massearme Sterne
- Galaxienbildung
- Die Schüler kennen Voraussetzungen für die  
Entstehung von Leben

Energieerzeugung

HRD

Bedeutung der Computersimulation

Bildung schwerer Elemente

Stabile Bedingungen

Abschätzungen

Leben auf der Erde



# Anhang: Lehrplan

Das Zeitalter der entarteten Sterne:

Die Schüler gewinnen Einblick in die Sternentwicklung

- Braune Zwerge
- Weiße Zwerge
- Neutronensterne
- Schwarze Löcher

Leben in den Atmosphären weißer Zwerge

Definition

Das Zeitalter der schwarzen Löcher:

Die Schüler gewinnen Einblick in die Theorie der schwarzen Löcher

- Schwarze Löcher
- Raumkrümmung und Kräfte
- Strahlung schwarzer Löcher
- Entwicklung schwarzer Löcher

Wachstum schwarzer Löcher  
Protonenzerfall

Gravitations- und Hawking-Strahlung

Computer aus schwarzen Löchern



# Anhang: Lehrplan

Das Zeitalter der Dunkelheit:

Die Schüler gewinnen Einblick in aktuelle Theorien vom Ende unseres Universums

Die Schüler erkennen die Entwicklung des Universums als einen evolutionären Prozess

- Verhalten der Elementarteilchen
- Wärmetod des Universums
- Vakuumenergie
- Theorien zur Erschaffung neuer Universen

Eingehen auf verschiedene Modelle  
Evolutionäre Universen



# Quellen & Literaturempfehlungen

- $\alpha$ Centauri (Reihe von BR-alpha): <https://www.br.de/fernsehen/ard-alpha/sendungen/alpha-centauri/index.html> (15.03.2022)
- [https://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Netzwerk\\_Teilchenwelt/material/Band\\_1\\_UnterrichtsmaterialTP\\_2018.pdf](https://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/material/Band_1_UnterrichtsmaterialTP_2018.pdf) (15.03.2022)
- [http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/html/Lehre/HS2011/Temp\\_EntwHandout\\_Bett.pdf](http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/html/Lehre/HS2011/Temp_EntwHandout_Bett.pdf) (15.03.2022)
- <https://www.zeuthen.desy.de/~kolanosk/astro0910/skripte/kosmos01.pdf> (15.03.2022)
- Michael A. G. Michaud: Contact with Alien Civilizations, Springer, 2007
- Stephen Webb: Wo sind sie alle? Fünfzig Lösungen für das Fermi-Paradoxon, Springer, 2021
- Cixin Liu: „Die drei Sonnen“, Heyne, 2016

