

# Nukleosynthese im Urknall

Hanno Rein

<http://hanno-rein.de>

27. Januar 2005

## Georges-Henri Lemaître (1895-1966)

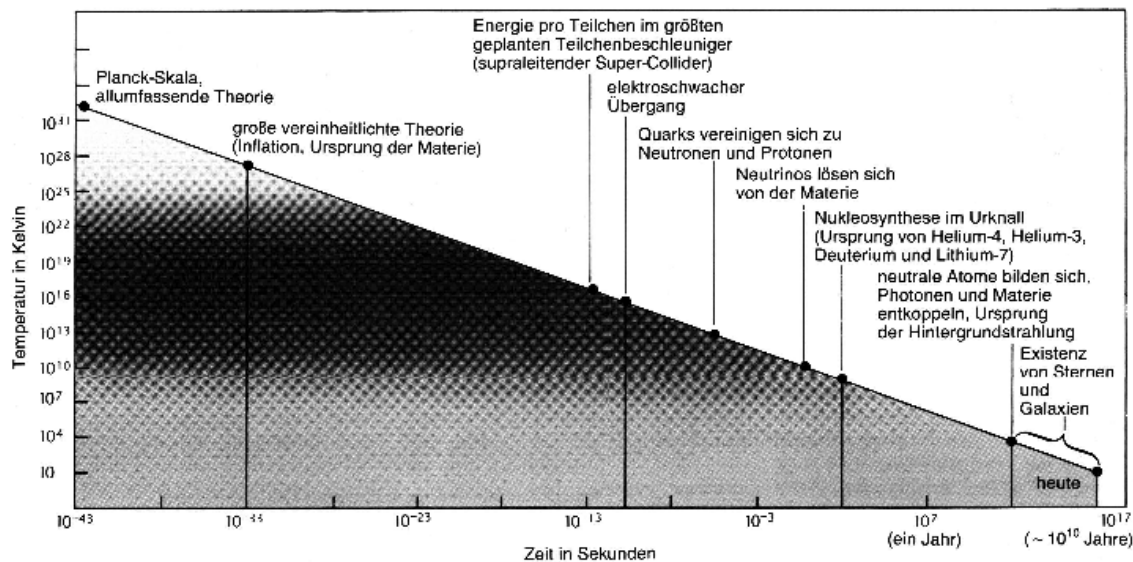
Auf einem stark abgekühlten Aschehaufen stehend, beobachten wir das allmähliche Verlöschen der Sonnen, und wir versuchen uns des verschwundenen Glanzes des Ursprungs der Welten zu erinnern.

## Gliederung

<b>1 Motivation</b>	<b>2</b>
1.1 Einordnung . . . . .	2
1.2 Bestätigung der Urknalltheorie . . . . .	2
1.3 Vorhersagen . . . . .	2
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Neutronen und Protonen . . . . .	3
2.2 Leichte Elemente . . . . .	4
2.3 Metalle . . . . .	5
2.4 Parameter . . . . .	6
<b>3 Neutrino flavours</b>	<b>7</b>
3.1 CERN . . . . .	7
3.2 BBN . . . . .	7
<b>4 Beobachtungen</b>	<b>8</b>
4.1 $^4\text{He}$ . . . . .	8
4.2 Deuterium . . . . .	8
4.3 $^7\text{Li}$ . . . . .	9
<b>5 Vergleich Rechnungen/Beobachtungen</b>	<b>9</b>
<b>6 Literatur</b>	<b>10</b>

# 1 Motivation

## 1.1 Einordnung



## 1.2 Bestätigung der Urknalltheorie

- Sternenlicht reicht nicht aus um  ${}^4\text{He}$  zu bilden
- Freigesetzte Energie pro  ${}^4\text{He}$ : 27 MeV
- Masse  ${}^4\text{He}$ : 3728 MeV
- 

$$\frac{\rho_*}{\rho_{\text{He}}} = \frac{27}{3728} \quad \frac{\rho_*}{\rho_m} = \frac{1}{4} \frac{27}{3728} \approx 2 \cdot 10^{-3}$$

- Beobachtungen:

$$\frac{\rho_*}{\rho_m} \approx 3 \cdot 10^{-5}$$

## 1.3 Vorhersagen

- Test der Kosmologie und Teilchenphysik
  - Neutrino Flavours
  - Starke Wechselwirkung
  - Elektromagnetische Wechselwirkung
  - Schwache Wechselwirkung
- Baryonendichte
- Temperatur Hintergrundstrahlung

## 2 Theorie

### 2.1 Neutronen und Protonen

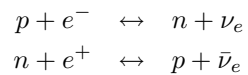
#### Thermisches Gleichgewicht

$$T \geq 10^{10} \text{K} = 1 \text{MeV}$$

- Neutronen und Protonen im Gleichgewicht:

$$\frac{N_n}{N_p} = \exp\left(-c^2 \frac{m_n - m_p}{k_B T}\right)$$

- $c^2(m_n - m_p) = 1.293 \text{MeV}$
- Gleichgewichtsreaktionen:



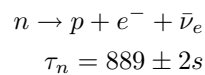
#### Entkopplung der Neutrinos

$$T \approx 0.8 \text{MeV}$$

- Dichte gering
- keine Wechselwirkungen mit Neutrinos mehr
- Verhältnis ist

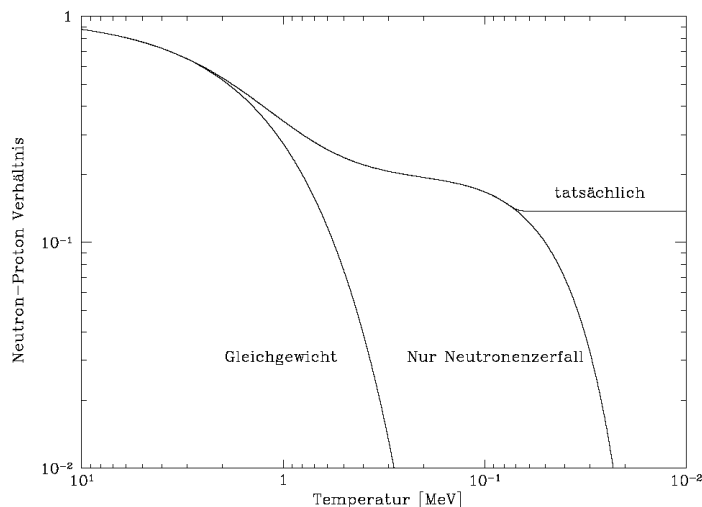
$$\frac{N_n}{N_p} = \frac{1}{6}$$

- Neutronenzerfall findet unabhängig von  $T$  statt:



- Halbwertszeit entscheidender Faktor

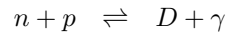
#### Neutronenzerfall



## 2.2 Leichte Elemente

### Deuterium Produktion

$t > 100s$  :



- wenig Photonen mit  $E > 2.2$  MeV
- keine Photodisintegration mehr

### Gamow Kriterium (1946)

- Deuterium Produktionsrate entscheidend
- zu viel  $D \Rightarrow$  keine  $n$  für andere Elemente
- zu wenig  $D \Rightarrow D$  fehlt bei weiteren Fusionsschritten
- notwendige Bedingung:

$$n_B \langle \sigma v \rangle t \approx 1$$

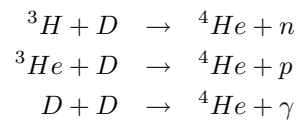
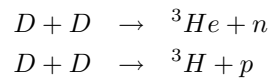
- Gamow: Vorraussage der CMB-Temperatur
- $t$  bestimmt durch Expansionsrate  
 $t \approx 200$  s
- $\langle \sigma v \rangle \approx 5 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$
- Baryondichte

$$n_{B,BBN} \approx \frac{1}{\langle \sigma v \rangle \cdot 200 \text{ s}} \approx 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$
$$n_{B,2005} \approx 10^7 \text{ cm}^{-3}$$

- $n \propto R^{-3}$

$$T_{2005} = T_{BBN} \left( \frac{n_{B,2005}}{n_{B,BBN}} \right)^{\frac{1}{3}} \approx 10 \text{ K}$$

### $^4\text{He}$ Produktionskette



### $^4\text{He}$ Produktion

- $^4\text{He}$  hat hohe Bindungsenergie
- Nahezu alle  $n$  enden in  $^4\text{He}$
- Erwarteter Massenanteil von  $^4\text{He}$

$$Y \approx \frac{2N_n}{N_n + N_p} = \frac{2 N_n/N_p}{N_n/N_p + 1} = \frac{2 \frac{1}{7}}{\frac{1}{7} + 1} = 0.25$$

## 2.3 Metalle

### Isotopentafel

10								<sup>17</sup> Ne	<sup>18</sup> Ne
9								<sup>16</sup> F	<sup>17</sup> F
8						<sup>13</sup> O	<sup>14</sup> O	<sup>15</sup> O	<sup>16</sup> O
7						<sup>12</sup> N	<sup>13</sup> N	<sup>14</sup> N	<sup>15</sup> N
6				<sup>9</sup> C	<sup>10</sup> C	<sup>11</sup> C	<sup>12</sup> C	<sup>13</sup> C	<sup>14</sup> C
5				<sup>8</sup> B	<sup>9</sup> B	<sup>10</sup> B	<sup>11</sup> B	<sup>12</sup> B	<sup>13</sup> B
4			<sup>6</sup> Be	<sup>7</sup> Be	<sup>8</sup> Be	<sup>9</sup> Be	<sup>10</sup> Be	<sup>11</sup> Be	<sup>12</sup> Be
3			<sup>5</sup> Li	<sup>6</sup> Li	<sup>7</sup> Li	<sup>8</sup> Li	<sup>9</sup> Li		
2		<sup>3</sup> He	<sup>4</sup> He	<sup>5</sup> He	<sup>6</sup> He		<sup>8</sup> He		
1	<sup>1</sup> H	<sup>2</sup> H	<sup>3</sup> H						
	0	1	2	3	4	5	6	7	8

Blaue Isotope sind stabil.

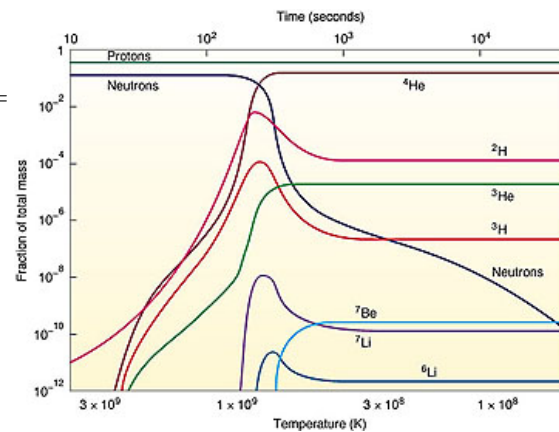
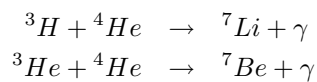
### Isotopentafel 2

10								<sup>17</sup> Ne	<sup>18</sup> Ne
9								<sup>16</sup> F	<sup>17</sup> F
8						<sup>13</sup> O	<sup>14</sup> O	<sup>15</sup> O	<sup>16</sup> O
7						<sup>12</sup> N	<sup>13</sup> N	<sup>14</sup> N	<sup>15</sup> N
6				<sup>9</sup> C	<sup>10</sup> C	<sup>11</sup> C	<sup>12</sup> C	<sup>13</sup> C	<sup>14</sup> C
5				<sup>8</sup> B	<sup>9</sup> B	<sup>10</sup> B	<sup>11</sup> B	<sup>12</sup> B	<sup>13</sup> B
4			<sup>6</sup> Be	<sup>7</sup> Be	<sup>8</sup> Be	<sup>9</sup> Be	<sup>10</sup> Be	<sup>11</sup> Be	<sup>12</sup> Be
3			<sup>5</sup> Li	<sup>6</sup> Li	<sup>7</sup> Li	<sup>8</sup> Li	<sup>9</sup> Li		
2		<sup>3</sup> He	<sup>4</sup> He	<sup>5</sup> He	<sup>6</sup> He		<sup>8</sup> He		
1	<sup>1</sup> H	<sup>2</sup> H	<sup>3</sup> H						
	0	1	2	3	4	5	6	7	8

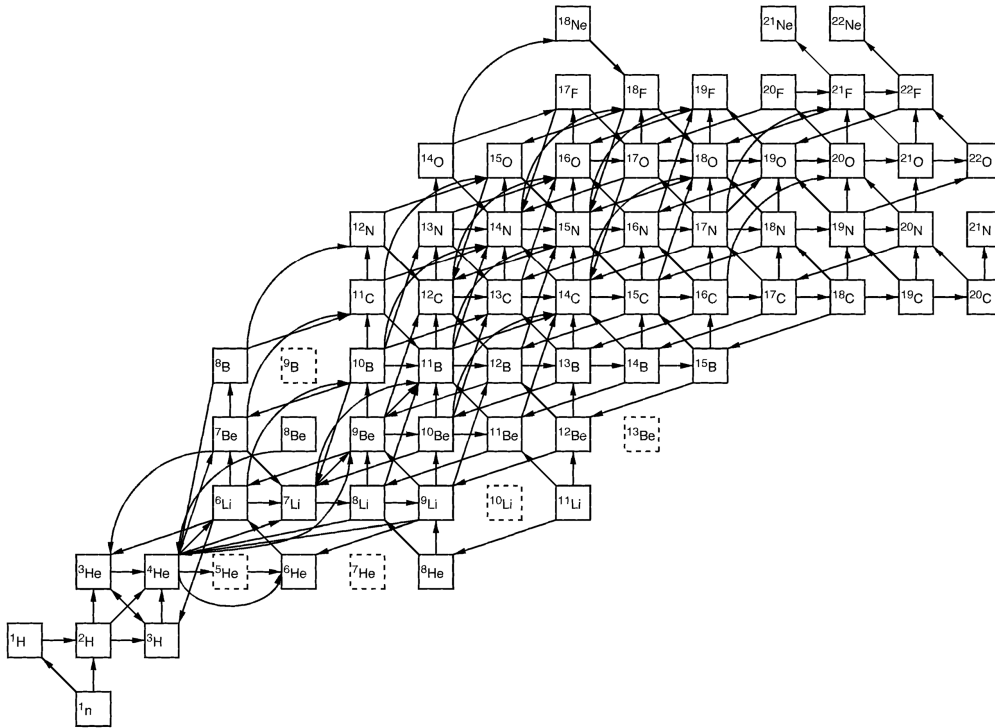
Die grünen Isotope sind bereits durch Fusionsprozesse entstanden. Die rot gekennzeichneten sind instabil.

### Metallsynthese

- Reaktionen müssen über Zweierstöße ( $A = 5$  und  $8$ ) gehen
- Seltene Partner  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$  notwendig



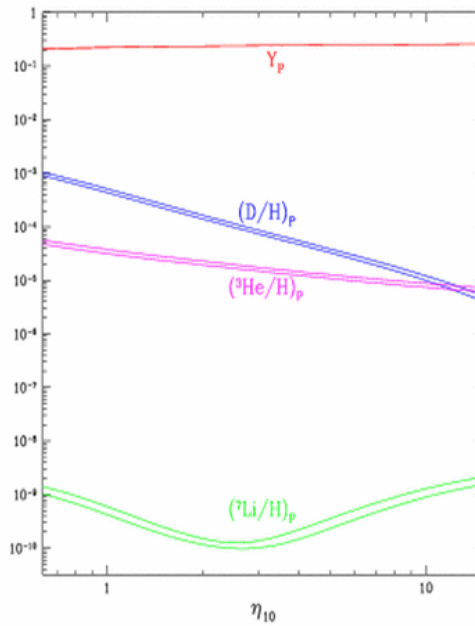
Die Wirklichkeit sieht komplizierter aus



## 2.4 Parameter

Baryonendichte  $\eta$

- Mehr Photonen, mehr Photodisintegration
- je größer  $\eta$ , desto weniger Deuterium
- $Y$  relativ unabhängig von  $\eta$ , da hohe Bindungsenergie

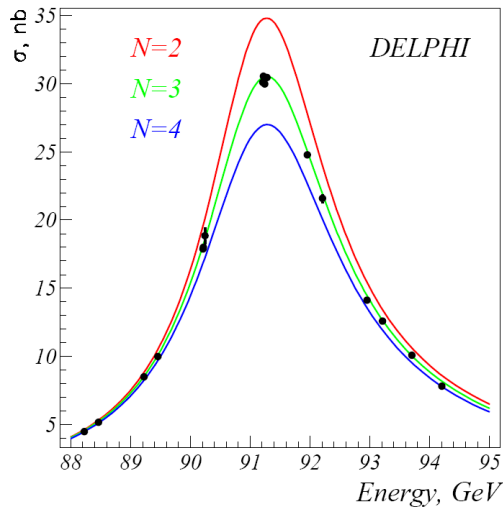
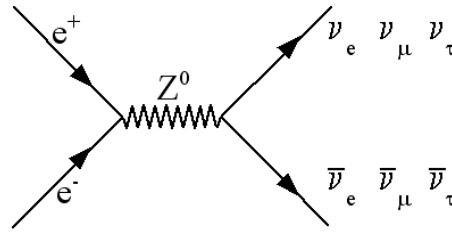


### 3 Neutrino flavours

#### 3.1 CERN

##### Z<sub>0</sub> Boson

- Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung
- keine elektrische Ladung
- Spin 1
- Masse 91 GeV

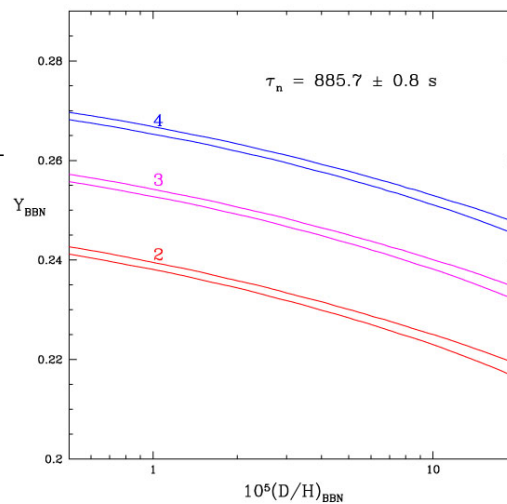


- CERN
- Large Electron Positron Collider
- $N_\nu = 2.99 \pm 0.01$

#### 3.2 BBN

##### Neutrino Abhängigkeit

- Verhältnis  $N_n/N_p$  abhängig von der Anzahl der leichten Neutrinosflavours
- $H \propto \rho^{1/2} \cong (\rho_\gamma + \rho_e + \rho_\nu)^{1/2}$
- früheres Ausfrieren von  $N_n/N_p$
- Temperatur höher  $\rightarrow$  Verhältnis höher



## 4 Beobachtungen

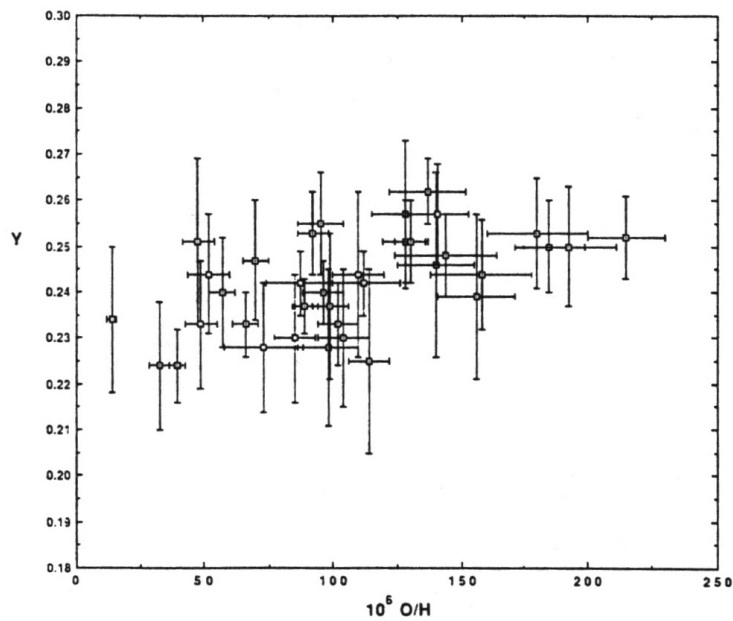
### 4.1 $^4\text{He}$

- Produkt der Kernfusion in Sternen
- Suche nach metallfreien Gebieten
- z.B.: extragalaktische HII-Regionen



Orion-Nebel

- $Z$ -Korrelation



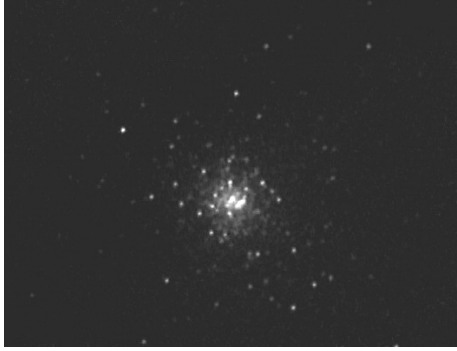
### 4.2 Deuterium

- Suche nach metallarmen Gebieten
- $D$  wird in Sternen komplett verbrannt
- Messung ist Untergrenze
- Ergebnisse  $D/H$ :  
Im interstellaren Medium  $1.8 \cdot 10^{-5}$ , in Meteoriten:  $2.5 \cdot 10^{-5}$
- Messungen inkonsistent

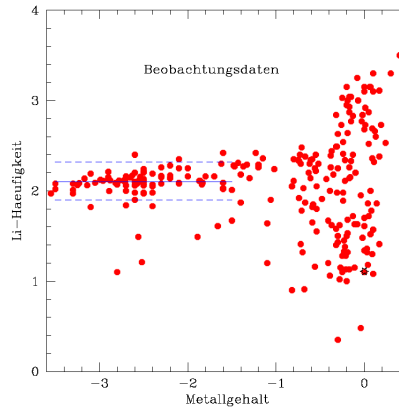


### 4.3 ${}^7\text{Li}$

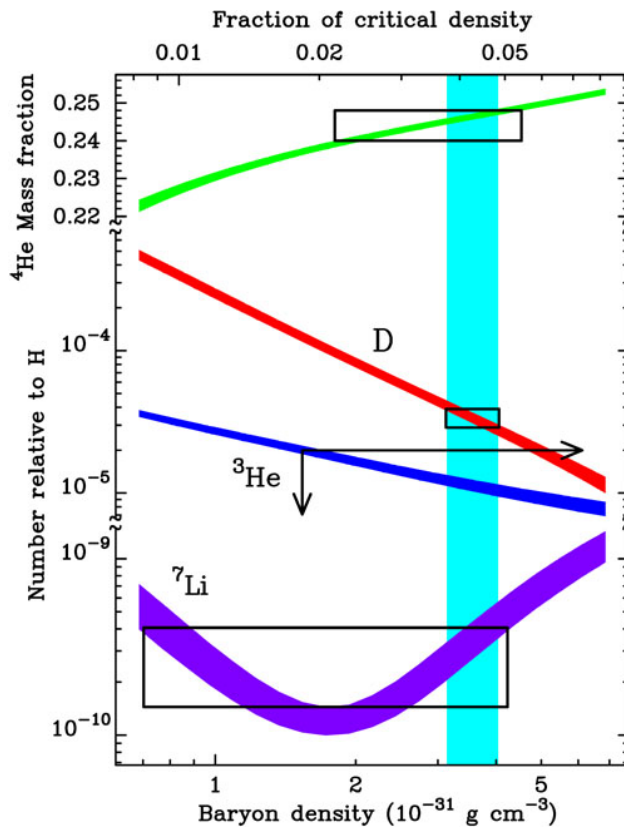
- ${}^7\text{Li}$  wird in Sternen erzeugt/vernichtet
- komplizierte Prozesse
- Suche nach alten Sternen in Galaxis



M92



## 5 Vergleich Rechnungen/Beobachtungen



## 6 Literatur

- [1] THE WHOLE WORLD. *Wikipedia*.  
<http://wikipedia.org>.
- [2] NORMAN K. GLENDENNING. *After The Beginning: A Cosmic Journey Through Space And Time*.  
Imperial College Press, 2004.
- [3] DAVID N. SCHRAMM. *Big Bang Nucleosynthesis: The Standard Model and Alternatives*.  
Physica Scripta. Vol. T36, 22-29,1991
- [4] WALKER, STEIGMAN, SCHRAMM, OLIVE, KANG. *Primordial Nucleosynthesis Redux*.  
The Astrophysical Journal, 376:51-69, 1991.
- [5] CHRISTLIEB, BESELL, BEERS & OTHERS. *A stellar relic from the early Milky Way*.  
Nature Vol. 419, 2002.
- [6] JÖRN WILMS. *Observational Cosmology*.  
<http://astro.uni-tuebingen.de/~wilms/teach/>.
- [7] ACHMIS WEISS. *Elementsynthese im Urknall*.  
<http://www.mpa-garching.mpg.de/~weiss/>.
- [8] NICHOLAS M. SHORT. *The Remote Sensing Tutorial*.  
<http://rst.gsfc.nasa.gov/>.
- [9] CHRISTOPHE BALLAND. *Primordial Nucleosynthesis*.  
<http://aether.lbl.gov/WWW/tour/elements/early/>.
- [10] CHRIS HEILMAN. *The Isotopes*.  
<http://chemlab.pc.maricopa.edu/periodic/isotopes.html>.