

# Nukleosynthese im Urknall

Hanno Rein

Seminar über Astroteilchenphysik  
Universität Tübingen

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 entschwundenen Glanzes des Ursprungs der Welten zu erinnern.*

# Nukleosynthese im Urknall

## Motivation

## Theorie

Neutronen und Protonen

Leichte Elemente

Metalle

Parameter

## Neutrino flavours

CERN

BBN

## Beobachtungen

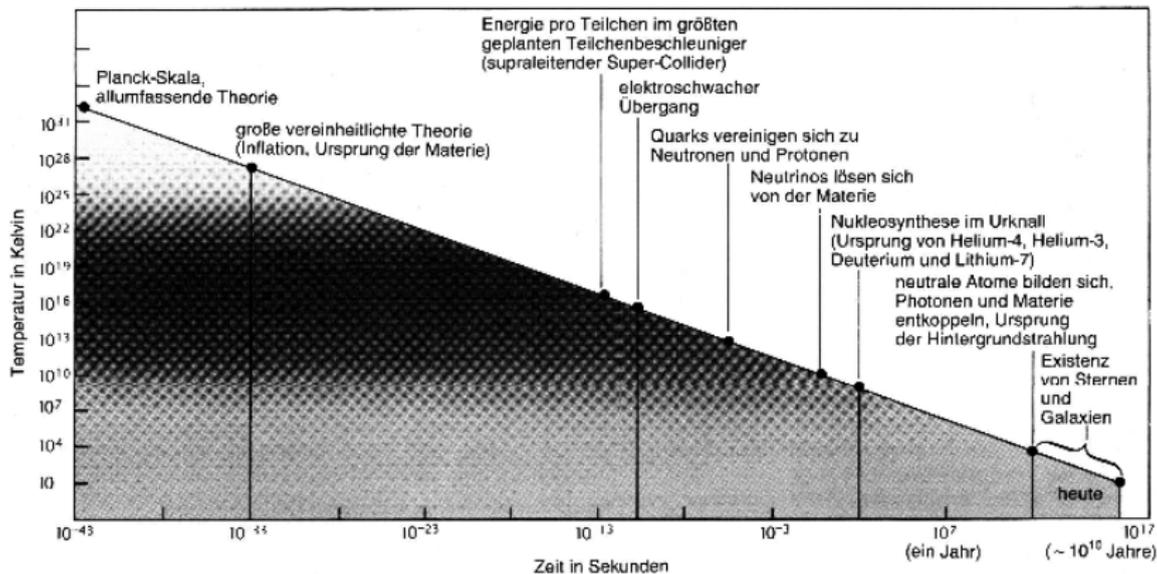
$^4\text{He}$

Deuterium

## Vergleich Rechnungen/Beobachtungen

Baryonendichte

# Einordnung



## 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
- ▶

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

- ▶ Beobachtungen:

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

# Vorhersagen

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

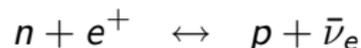
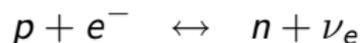
## Thermisches Gleichgewicht

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

- ▶ 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:



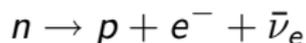
## Entkopplung der Neutrinos

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

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

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

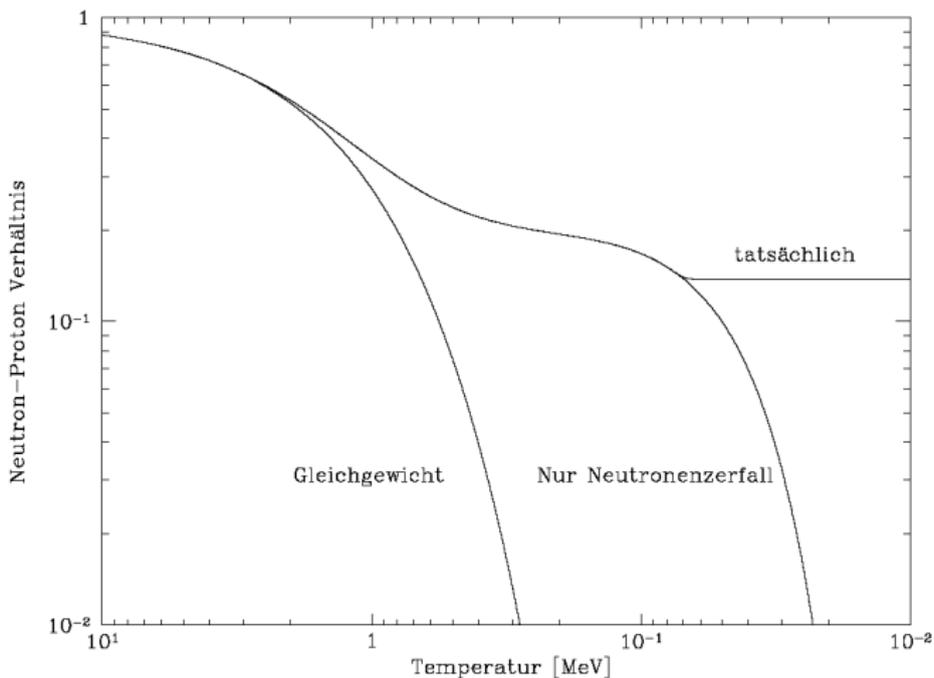
- ▶ Neutronenzerfall findet unabhängig von  $T$  statt:



$$\tau_n = 889 \pm 2 \text{ s}$$

- ▶ Halbwertszeit entscheidender Faktor

# Neutronenzerfall



# Deuterium Produktion

$t > 100s$  :



- ▶ wenig Photonen mit  $E > 2.2 \text{ MeV}$
- ▶ 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 Fusionschritten
- ▶ notwendige Bedingung:

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

## Gamow Kriterium (1946)

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

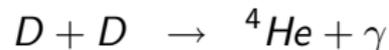
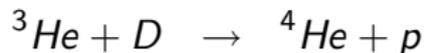
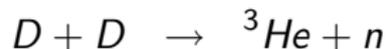
$$n_{B,BBN} \approx \frac{1}{\langle \sigma v \rangle \cdot 200 \text{ s}} \approx 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_{B,2005} \approx 10^7 \text{ cm}^{-3}$$

- ▶  $n \propto R^{-3}$

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

# $^4\text{He}$ Produktionskette



# $^4\text{He}$ Produktion

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

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

## Isotopentafel

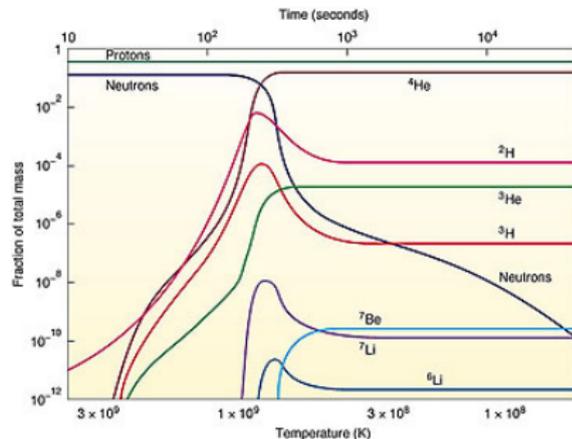
10								$^{17}\text{Ne}$	$^{18}\text{Ne}$
9								$^{16}\text{F}$	$^{17}\text{F}$
8						$^{13}\text{O}$	$^{14}\text{O}$	$^{15}\text{O}$	$^{16}\text{O}$
7						$^{12}\text{N}$	$^{13}\text{N}$	$^{14}\text{N}$	$^{15}\text{N}$
6				$^9\text{C}$	$^{10}\text{C}$	$^{11}\text{C}$	$^{12}\text{C}$	$^{13}\text{C}$	$^{14}\text{C}$
5				$^8\text{B}$	$^9\text{B}$	$^{10}\text{B}$	$^{11}\text{B}$	$^{12}\text{B}$	$^{13}\text{B}$
4			$^6\text{Be}$	$^7\text{Be}$	$^8\text{Be}$	$^9\text{Be}$	$^{10}\text{Be}$	$^{11}\text{Be}$	$^{12}\text{Be}$
3			$^5\text{Li}$	$^6\text{Li}$	$^7\text{Li}$	$^8\text{Li}$	$^9\text{Li}$		
2		$^3\text{He}$	$^4\text{He}$	$^5\text{He}$	$^6\text{He}$		$^8\text{He}$		
1	$^1\text{H}$	$^2\text{H}$	$^3\text{H}$						
	0	1	2	3	4	5	6	7	8

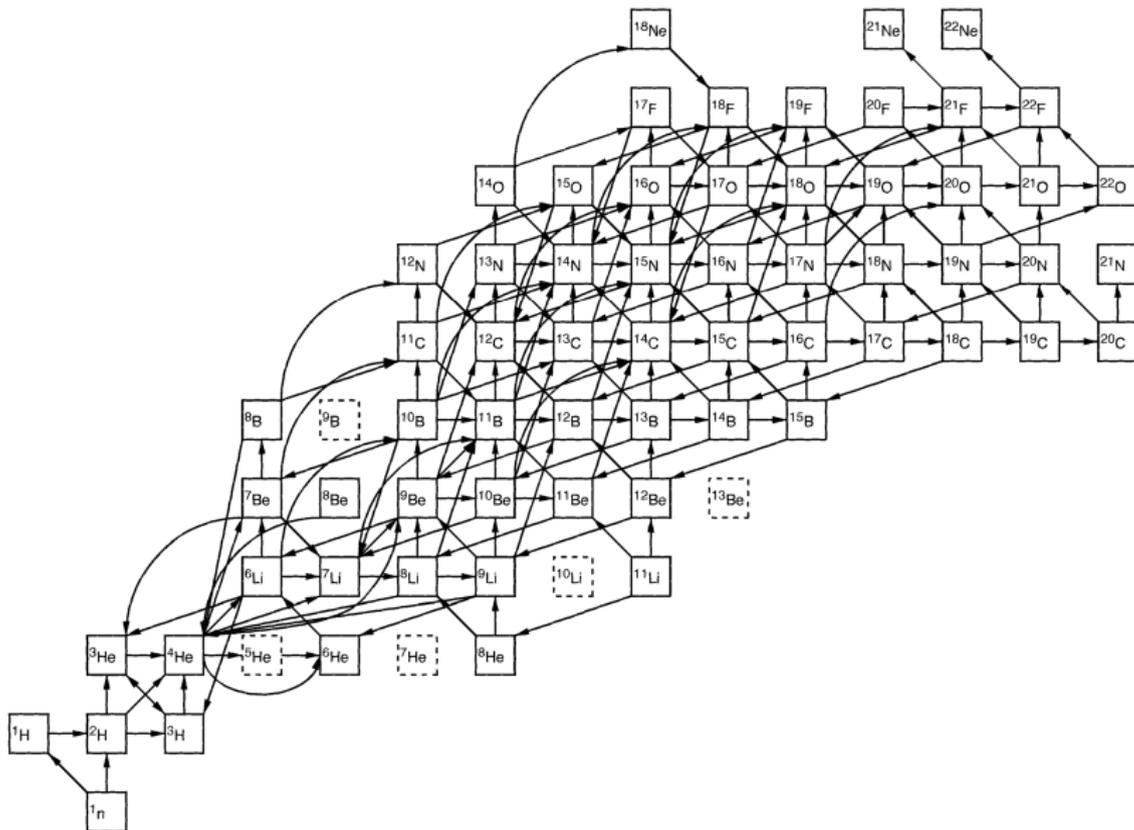
# Isotopentafel

10								$^{17}\text{Ne}$	$^{18}\text{Ne}$
9								$^{16}\text{F}$	$^{17}\text{F}$
8						$^{13}\text{O}$	$^{14}\text{O}$	$^{15}\text{O}$	$^{16}\text{O}$
7						$^{12}\text{N}$	$^{13}\text{N}$	$^{14}\text{N}$	$^{15}\text{N}$
6				$^9\text{C}$	$^{10}\text{C}$	$^{11}\text{C}$	$^{12}\text{C}$	$^{13}\text{C}$	$^{14}\text{C}$
5				$^8\text{B}$	$^9\text{B}$	$^{10}\text{B}$	$^{11}\text{B}$	$^{12}\text{B}$	$^{13}\text{B}$
4			$^6\text{Be}$	$^7\text{Be}$	$^8\text{Be}$	$^9\text{Be}$	$^{10}\text{Be}$	$^{11}\text{Be}$	$^{12}\text{Be}$
3			$^5\text{Li}$	$^6\text{Li}$	$^7\text{Li}$	$^8\text{Li}$	$^9\text{Li}$		
2		$^3\text{He}$	$^4\text{He}$	$^5\text{He}$	$^6\text{He}$		$^8\text{He}$		
1	$^1\text{H}$	$^2\text{H}$	$^3\text{H}$						
	0	1	2	3	4	5	6	7	8

# Metallsynthese

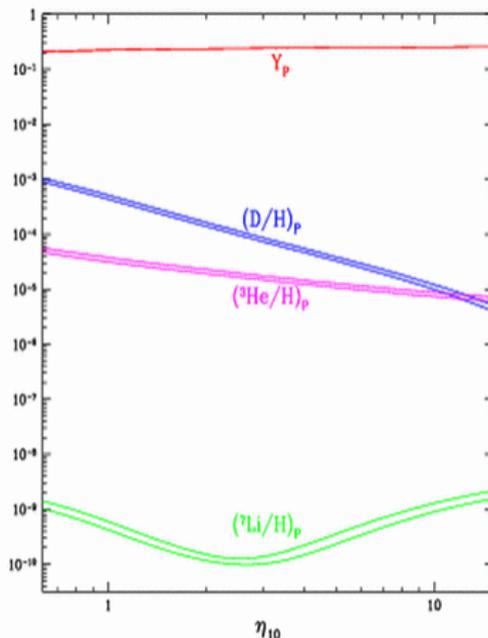
- ▶ Reaktionen müssen über Zweierstöße ( $A = 5$  und  $8$ ) gehen
- ▶ Seltene Partner  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^3\text{He}$  notwendig





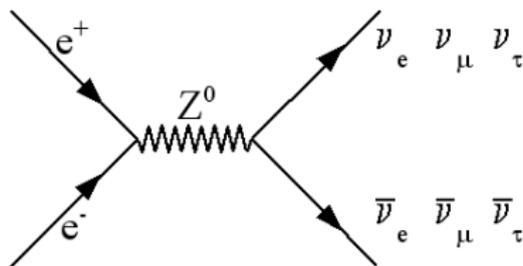
# Baryonendichte

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

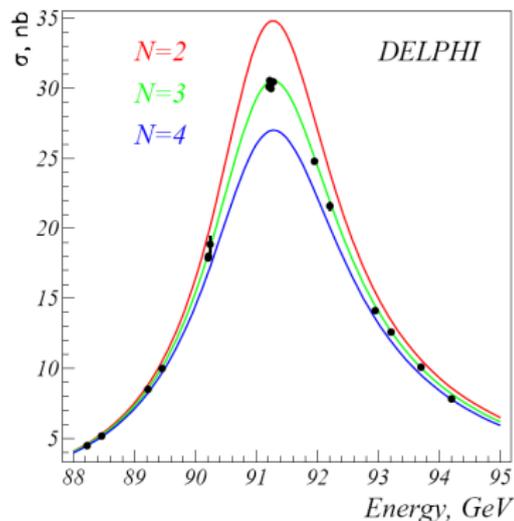


# Z<sub>0</sub> Boson

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



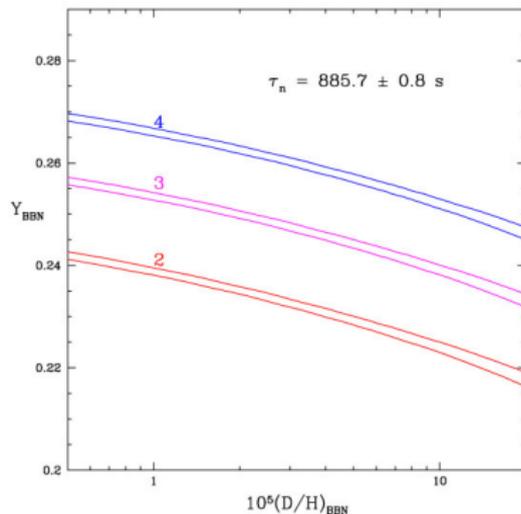
# Z<sub>0</sub> Boson



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

# 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



${}^4\text{He}$ 

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



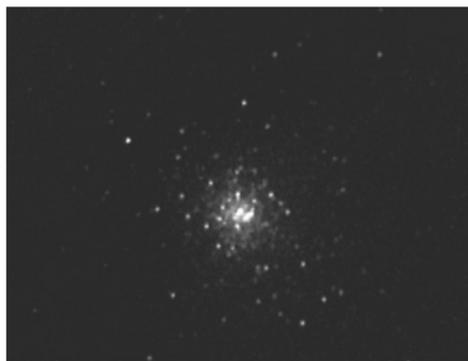
Orion-Nebel



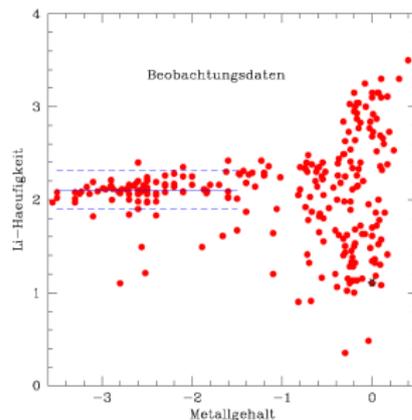
# Deuterium

- ▶ 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

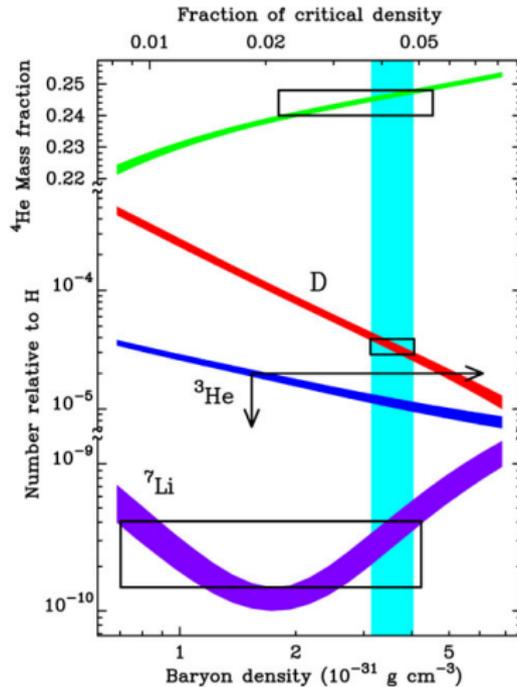
- ▶  ${}^7\text{Li}$  wird in Sternen erzeugt/vernichtet
- ▶ komplizierte Prozesse
- ▶ Suche nach alten Sternen in Galaxis



M92



# Vergleich Rechnungen/Beobachtungen



# Literatur



THE WHOLE WORLD. *Wikipedia*.

<http://wikipedia.org>.



NORMAN K. GLEN DENNING. *After The Beginning: A Cosmic Journey Through Space And Time*. Imperial College Press, 2004.



DAVID N. SCHRAMM. *Big Bang Nucleosynthesis: The Standard Model and Alternatives*. Physica Scripta. Vol. T36, 22-29,1991



WALKER, STEIGMAN, SCHRAMM, OLIVE, KANG. *Primordial Nucleosynthesis Redux*. The Astrophysical Journal, 376:51-69, 1991.



CHRISTLIEB, BESELL, BEERS & OTHERS. *A stellar relic from the early Milky Way*. Nature Vol. 419, 2002.



JÖRN WILMS. *Observational Cosmology*.  
<http://astro.uni-tuebingen.de/~wilms/teach/>.



ACHMIS WEISS. *Elementsynthese im Urknall*.  
<http://www.mpa-garching.mpg.de/~weiss/>.



NICHOLAS M. SHORT. *The Remote Sensing Tutorial*.  
<http://rst.gsfc.nasa.gov/>.



CHRISTOPHE BALLAND. *Primordial Nucleosynthesis*.  
<http://aether.lbl.gov/WWW/tour/elements/early/>.