

# Kosmologie und Astroteilchenphysik

Prof. Dr. Burkhard Kämpfer, PD Dr. Daniel Bemmerer

- Einführung in die Kosmologie
- Weltmodelle und kosmologische Inflation
- Thermische Geschichte des Universums
- **Urknall-Nukleosynthese**
- Dunkle Energie, dunkle Materie und die beschleunigte Expansion des Universums
- Kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung
- Supernovae als kosmische Standardkerzen
- Neutronensterne
- Entstehung und Nachweis kosmischer Strahlung
- Altersbestimmung des Universums
- Neutrinos aus der Sonne und ihre Oszillationen

4. Vorlesung, 03.05.2017

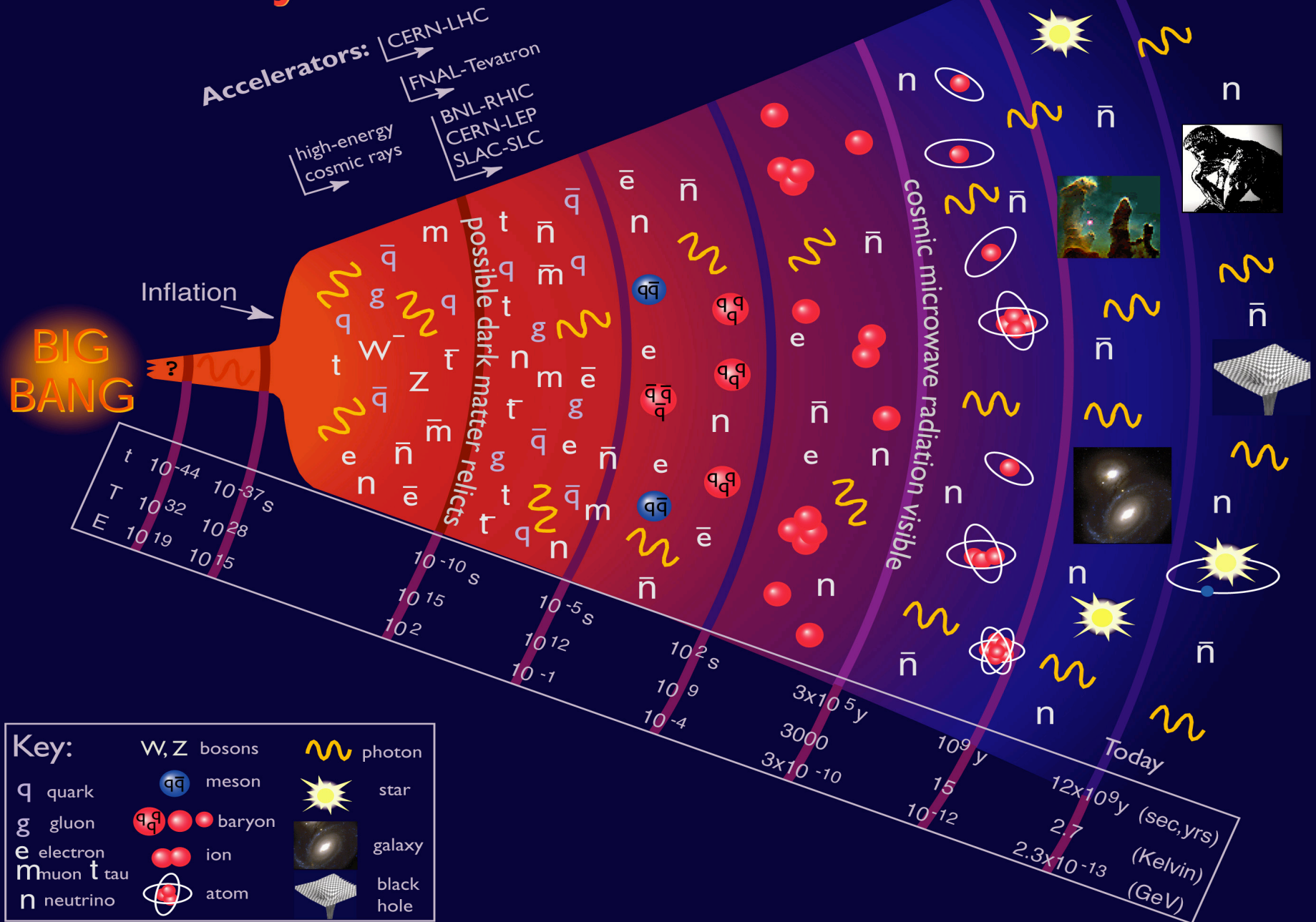


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN



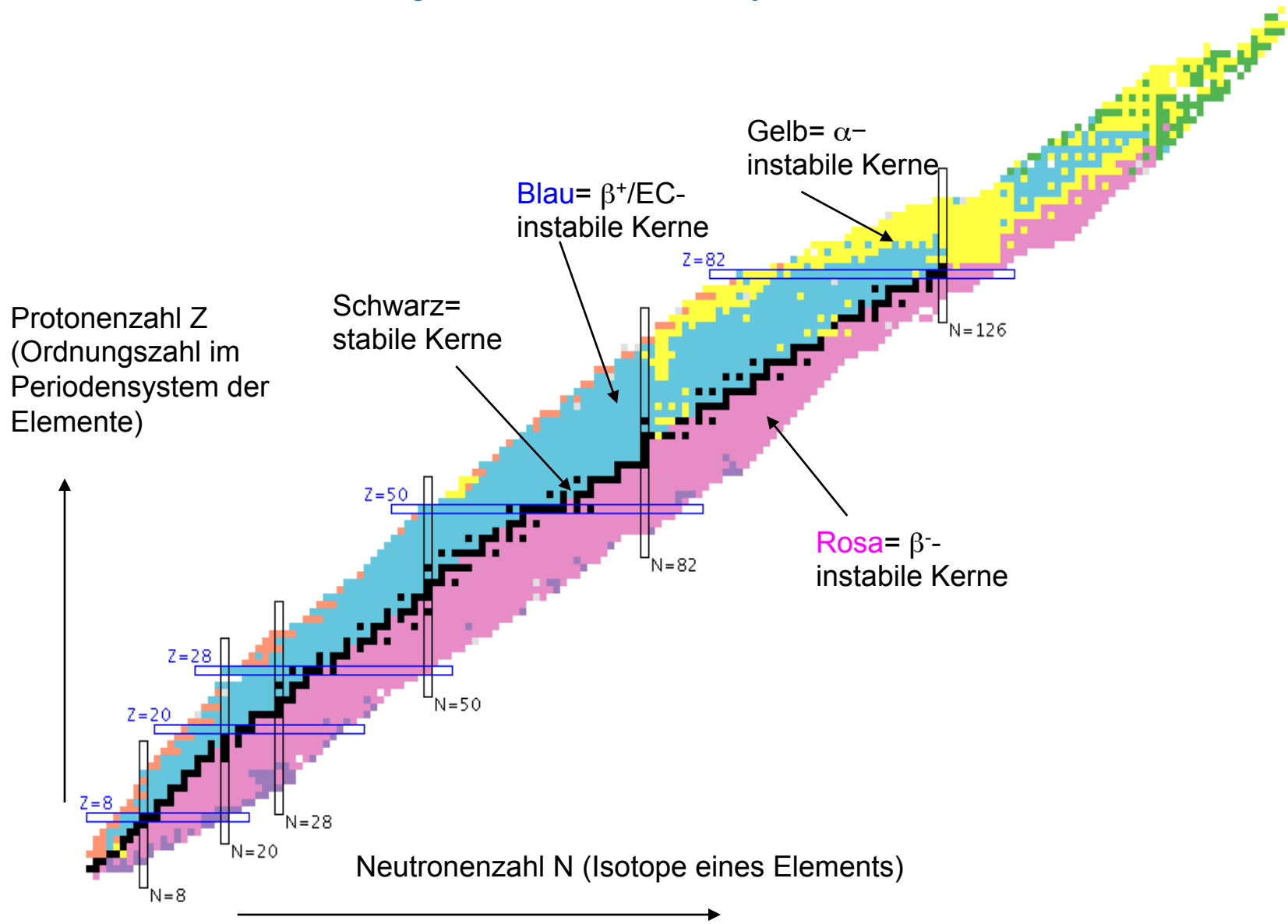


# History of the Universe





# Nuklidkarte, analog zum Periodensystem der Elemente





# Bindungsenergie und Entstehung der chemischen Elemente

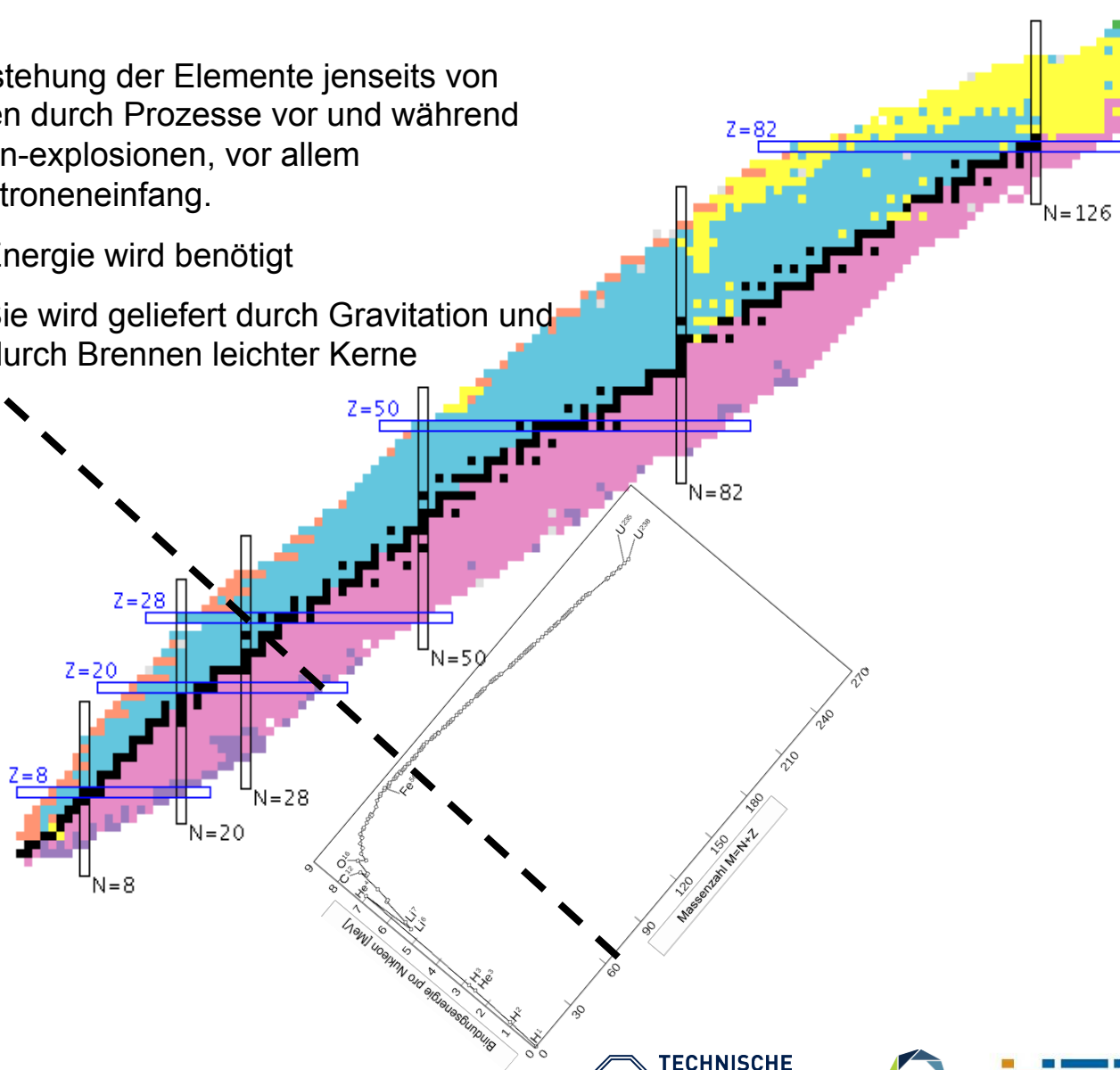
Entstehung der Elemente jenseits von Eisen durch Prozesse vor und während Stern-explosionen, vor allem Neutroneneinfang.

→ Energie wird benötigt

→ Sie wird geliefert durch Gravitation und durch Brennen leichter Kerne

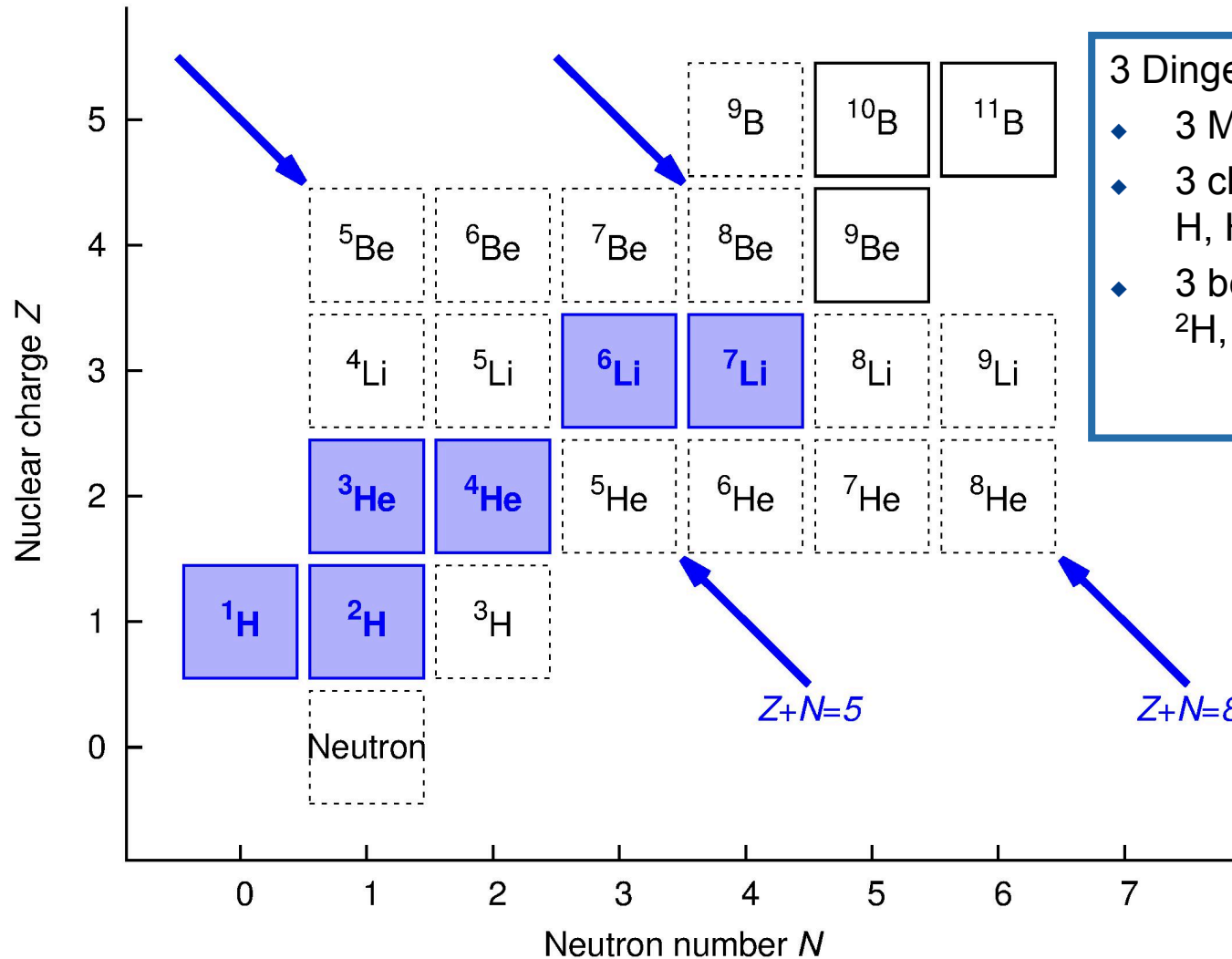
Entstehung der Elemente bis zum Eisen durch Fusion ("Brennen") von leichten Kernen zu schwereren Kernen, im Urknall oder in Sternen.

→ Energieproduktion





# Zeit $t \sim 3$ min, Temperatur $T \sim 1$ GK: Big Bang Nucleosynthesis (BBN)

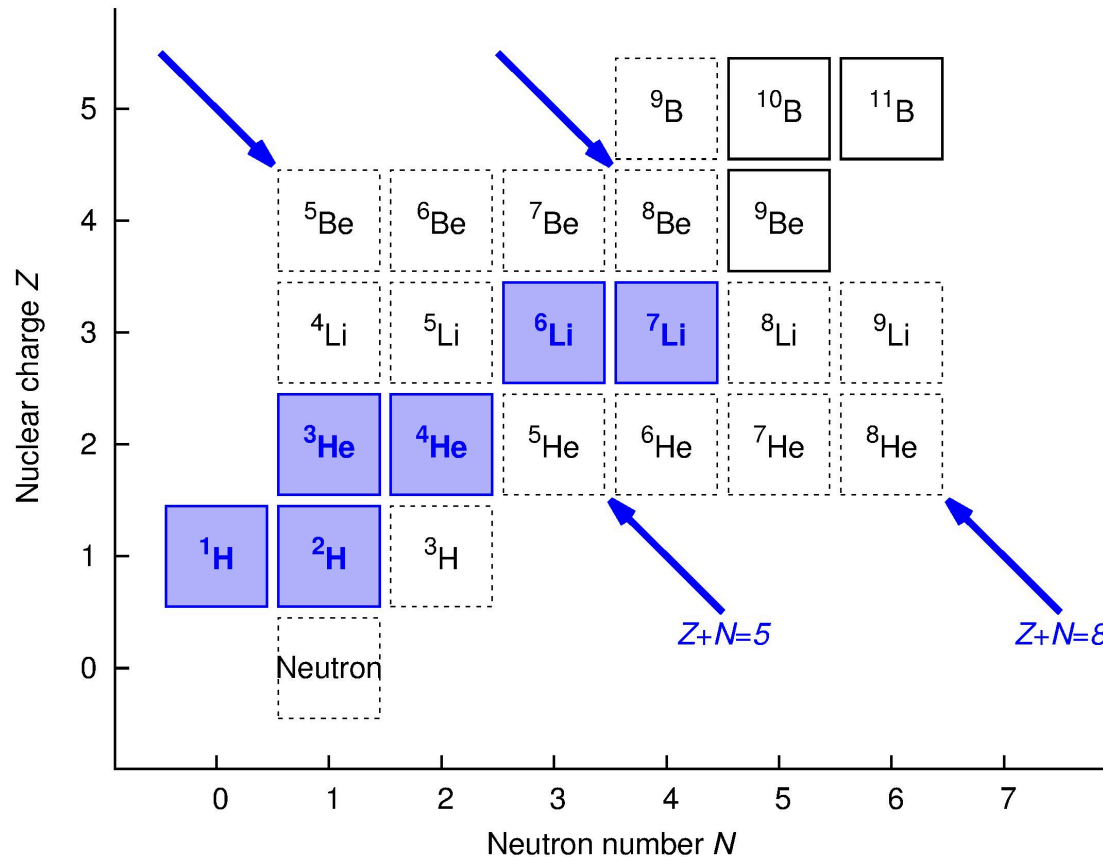


## 3 Dinge zum Merken

- ◆ 3 Minuten nach dem Urknall
- ◆ 3 chemische Elemente: H, He, Li
- ◆ 3 beobachtete Häufigkeiten:  ${}^2\text{H}$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^7\text{Li}$



# Mikrophysik und Makrophysik: Kernstruktur und Kosmologie



## Deuterium-Flaschenhals

- ◆ Deuterium ist nur bei hinreichend geringer Temperatur stabil

## Masseschranken bei 5 und 8

- ◆ Kein stabiler Kern mit Masse  $Z+N = 5$
- ◆ Kein stabiler Kern mit Masse  $Z+N = 8$

## Bindungsenergie des Atomkerns

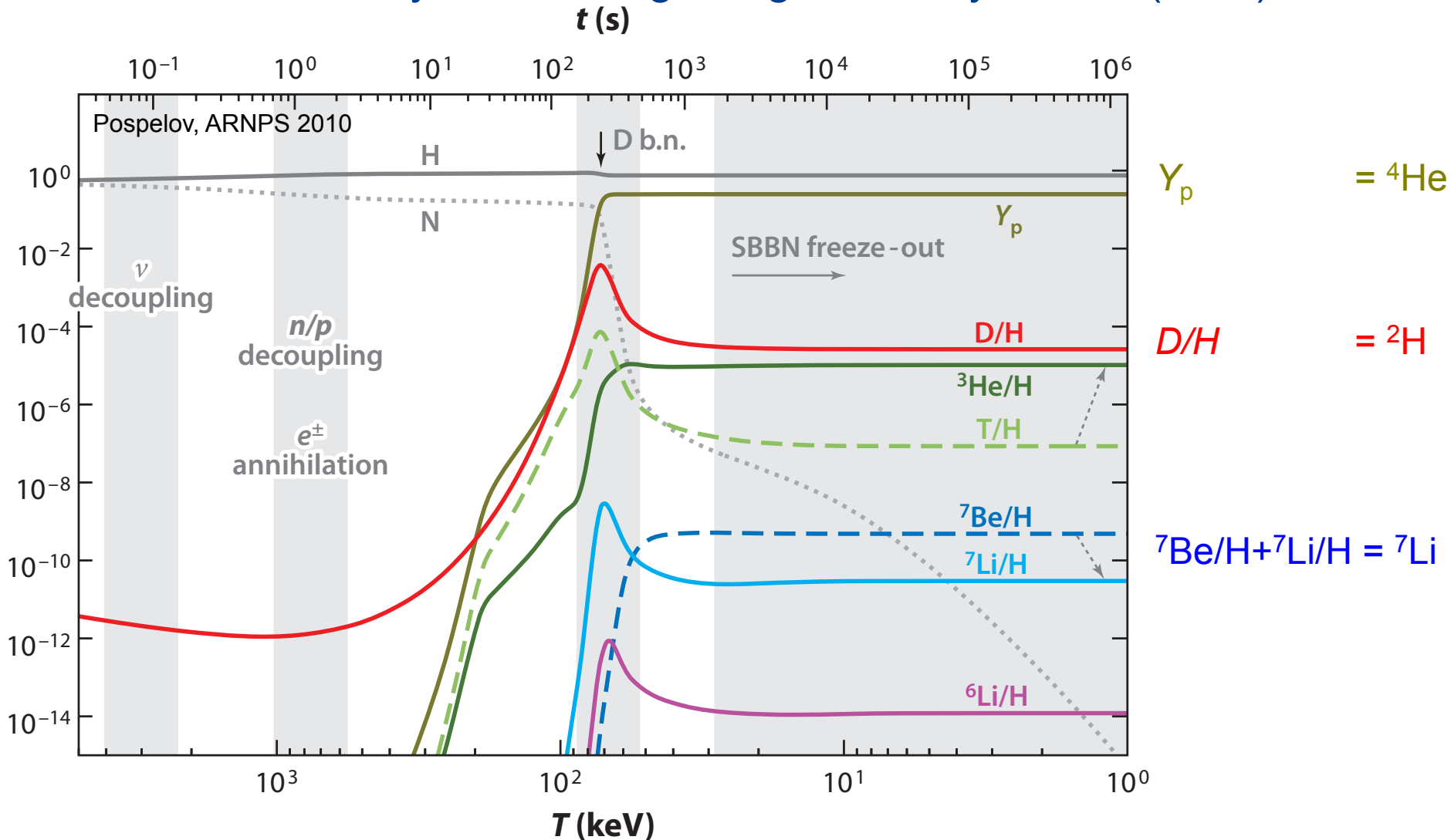
- ◆  $^4\text{He}$  ist der am stärksten gebundene leichte Kern

## Elektrostatische Abstoßung

- ◆ Eingangswahrscheinlichkeit für Nuklide fällt exponentiell mit  $Z$  und  $\sqrt{Z+N}$



# Urknall – Nukleosynthese - Big Bang Nucleosynthesis (BBN)



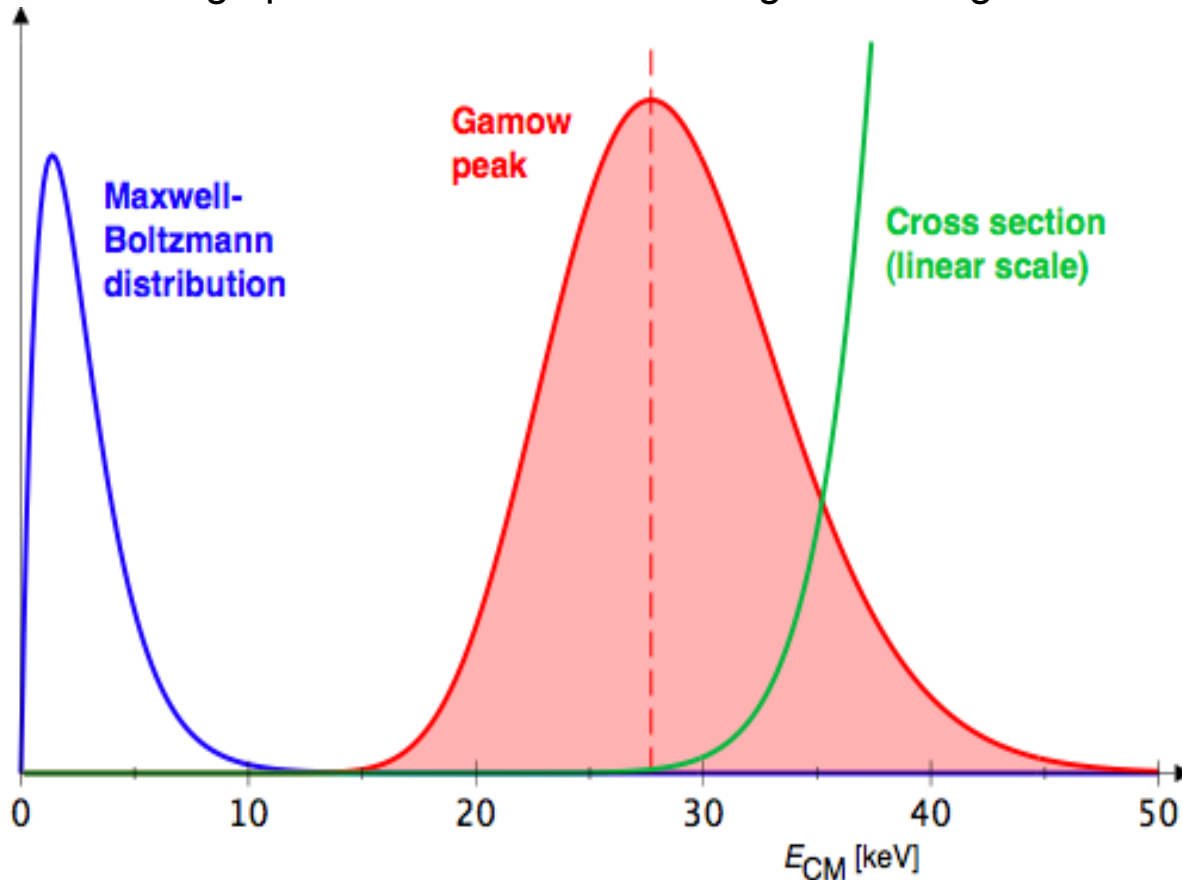
Radioisotope  ${}^3\text{H}$  (12.3 a) und  ${}^7\text{Be}$  (53 d)  
werden zu stabilem  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^7\text{Li}$



# Thermonukleare Reaktionsrate und Gamow-Peak

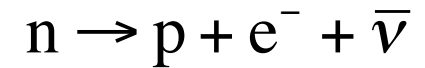
$$N_A \langle \sigma v \rangle = N_A \sqrt{\frac{8}{\pi \mu}} (k_B T)^{-3/2} \int \sigma(E) E \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) dE$$

- Ergibt sich aus Integral über Maxwell-Boltzmann-Verteilung multipliziert mit dem Wirkungsquerschnitt und der Relativgeschwindigkeit.



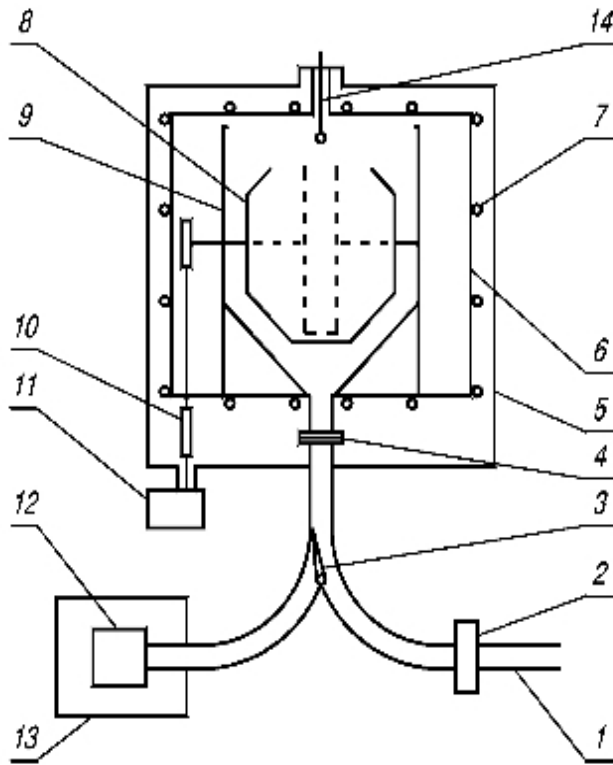


# Lebensdauer des freien Neutrons: Experiment



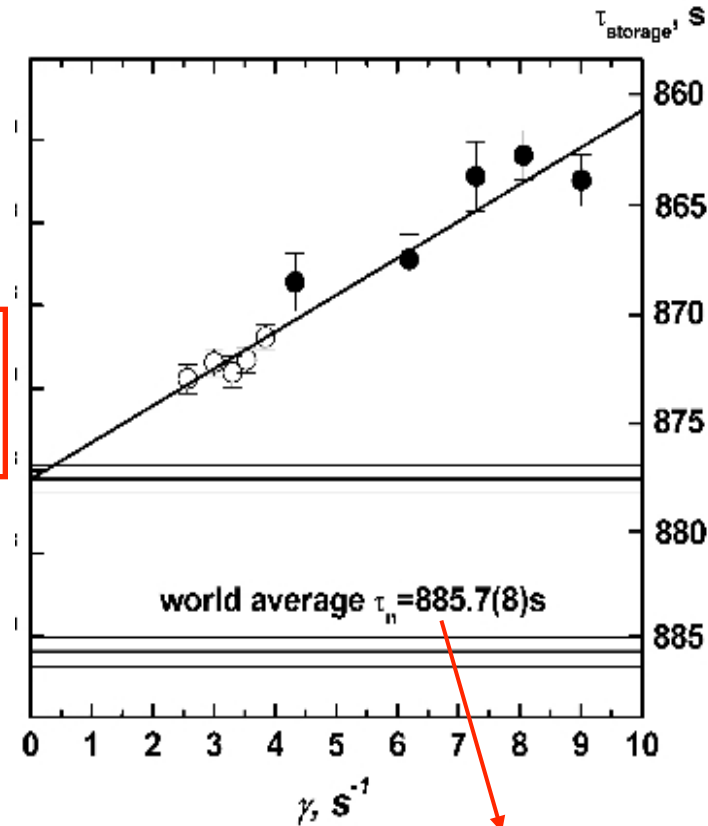
$$m_n = 939.6 \text{ MeV}/c^2 > 938.3 \text{ MeV}/c^2 + 0.5 \text{ MeV}/c^2 = m_p + m_e$$

Also Neutronen-Zerfall energetisch möglich!



$$t_{1/2} = \tau_n \ln 2$$

$$\frac{1}{\tau_{\text{storage}}} = \frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_{\text{loss}}}$$



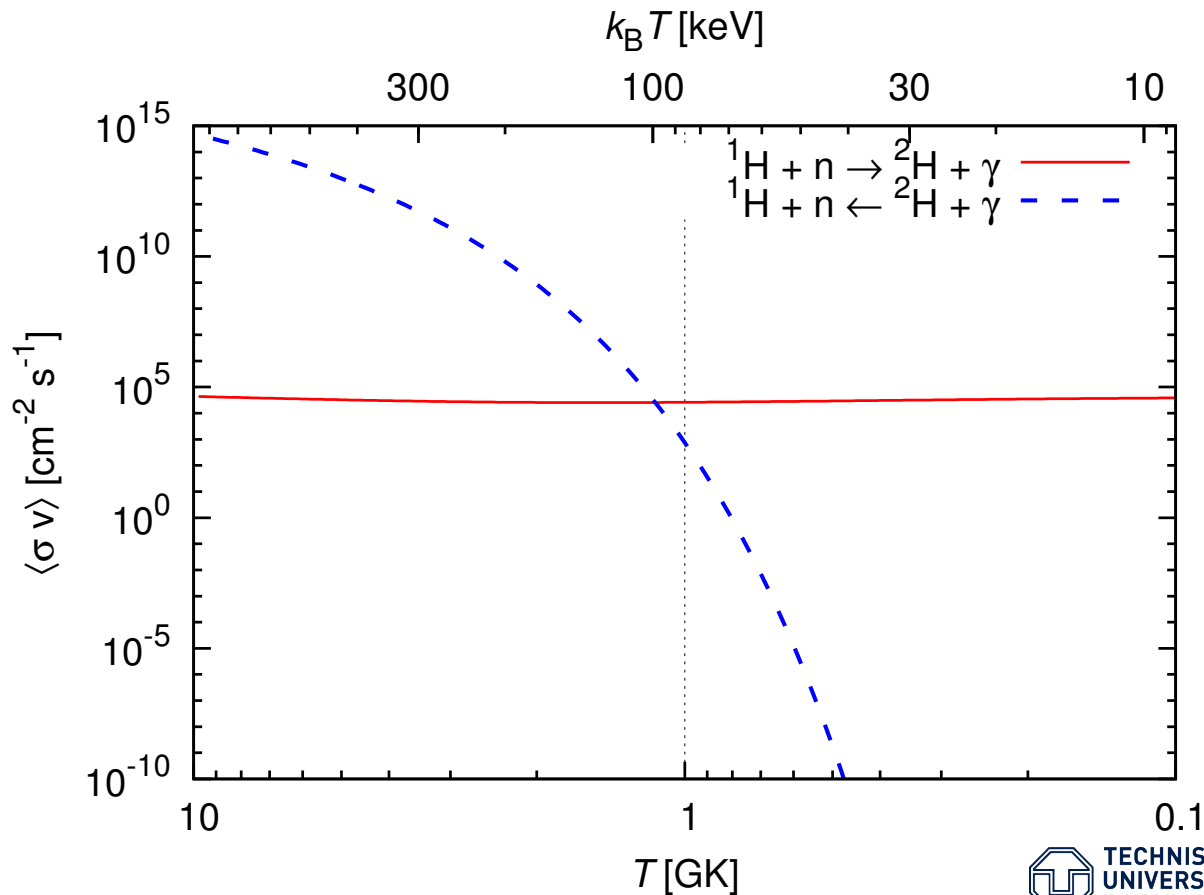
Experiment mit Neutronenfalle (geschlossen durch Gravitation)

A. Serebrov et al., Physics Letters B (2005), <http://arxiv.org/abs/nucl-ex/0408009>



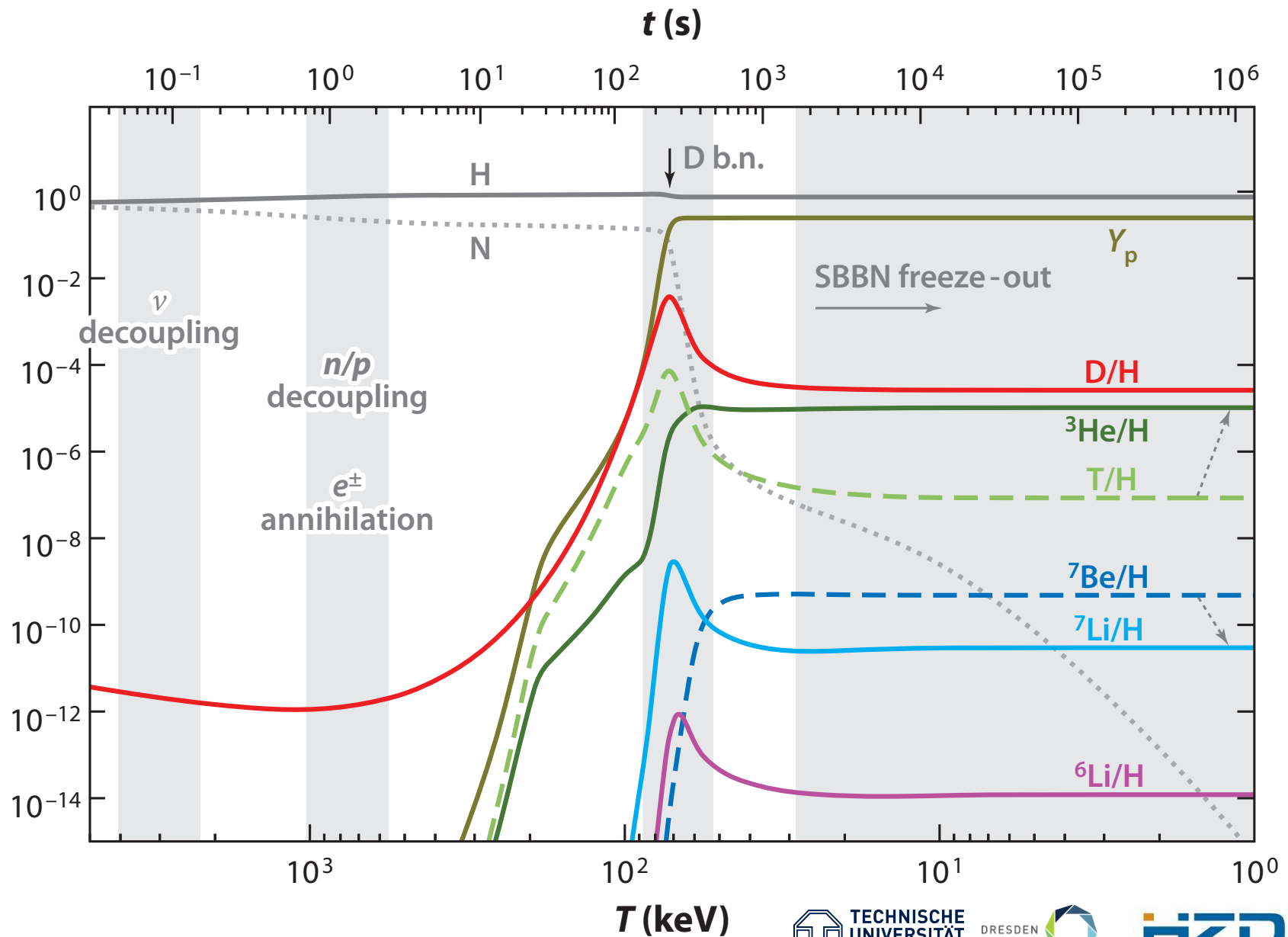
# Der Deuterium-Flaschenhals (deuterium bottleneck)

- Bindungsenergie von  $^2\text{D}$  ist sehr gering:  
 $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{D}$  Q-Wert = 2.225 MeV
- Photonen aus dem hochenergetischen Schwanz der Boltzmann-Verteilung können entstandenes Deuterium sehr effizient wieder dissoziieren





# Zeitliche und thermische Entwicklung



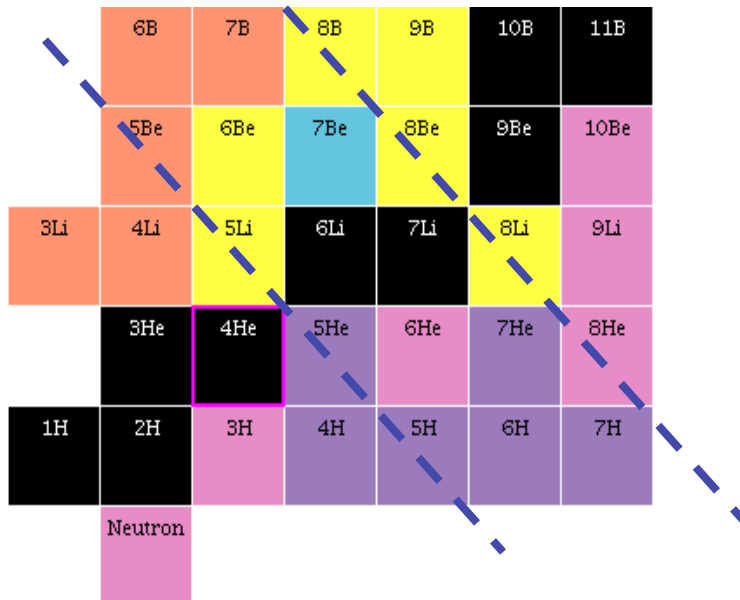
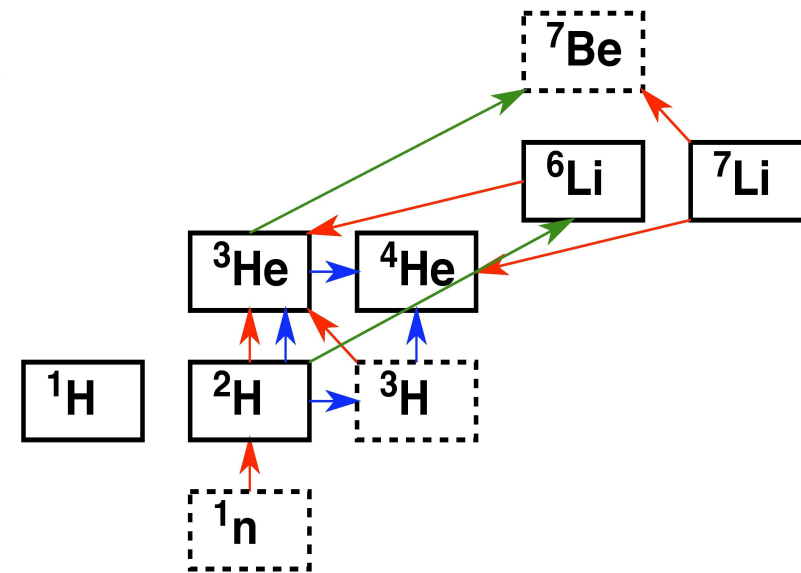
Pospelov, ARNPS 2010



# Entstehung von $^2\text{D}$ , $^3\text{He}$ , $^7\text{Be} \rightarrow ^7\text{Li}$ , vielleicht auch $^6\text{Li}$ parallel zu $^4\text{He}$

- Reaktionsnetzwerk bestimmt Häufigkeiten
- Monte-Carlo-Rechnungen unter Verwendung von Eingabewerten aus Experiment und Theorie (Mikrokosmos)
- $^7\text{Be}$  (Halbwertszeit 53 d) wird zu  $^7\text{Li}$
- Keine Entstehung von Kernen mit  $A > 7$

$(p, \gamma)$    
 $(p, \alpha)$    
 $(p, n)$    
 $(d, n)$    
 $(d, p)$    
 $(\alpha, \gamma)$

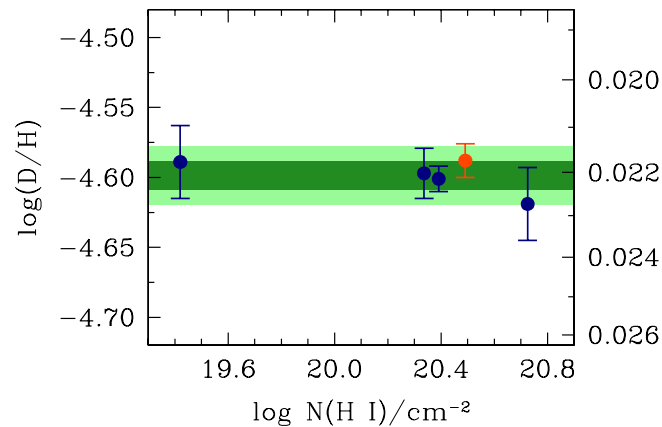
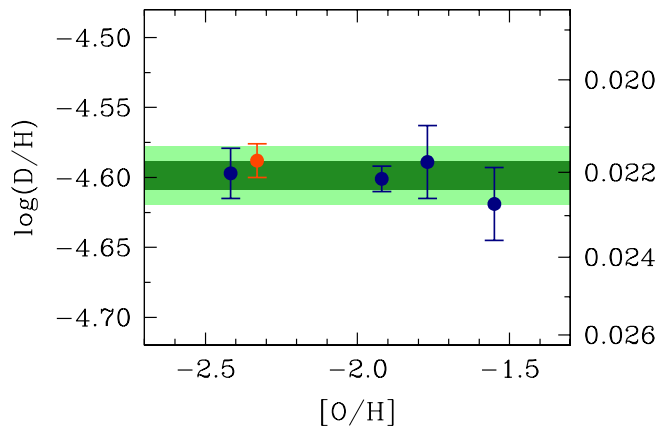
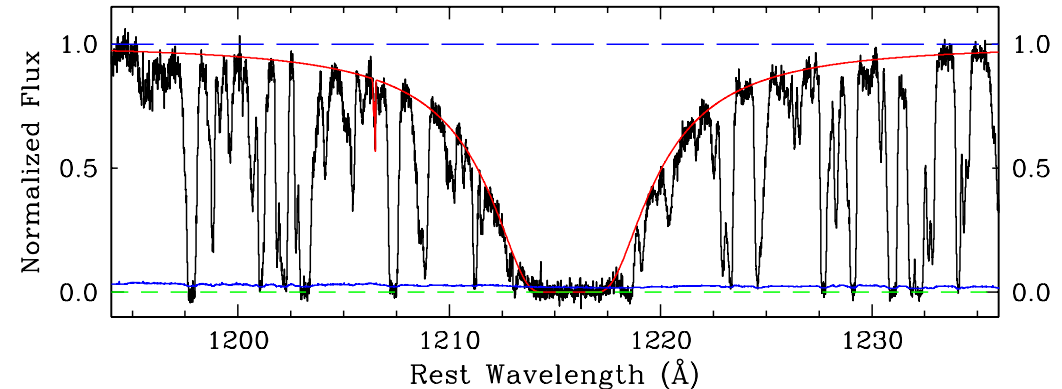
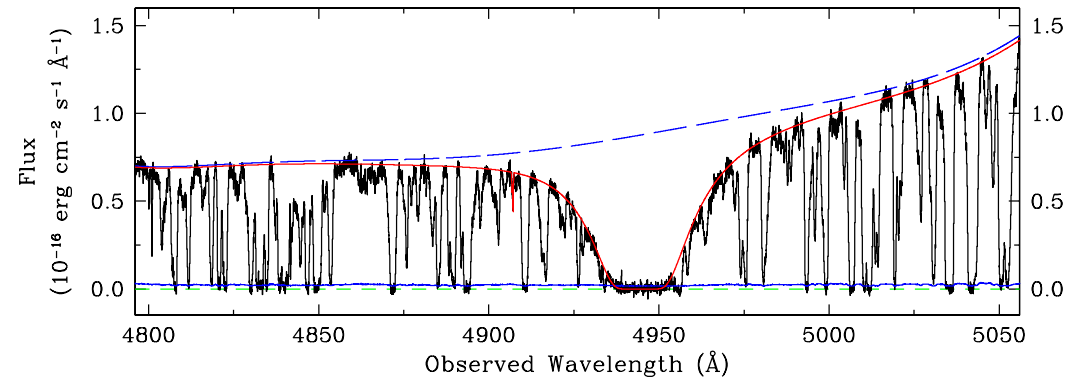


- Barrieren bei Masse 5 und 8 behindern den Aufbau zu höheren Massen durch Protoneneinfang
- Neutroneneinfang unbedeutend, da quasi alle Neutronen bereits in  $^4\text{He}$  gebunden
- Coulombschwelle  $\sim Z_1 Z_2$  behindert den Einfang von  $^4\text{He}$
- Ende der Urknall-Nukleosynthese bei  $^7\text{Li}$



# Beobachtung von Nuklidhäufigkeiten: $^2\text{D}$

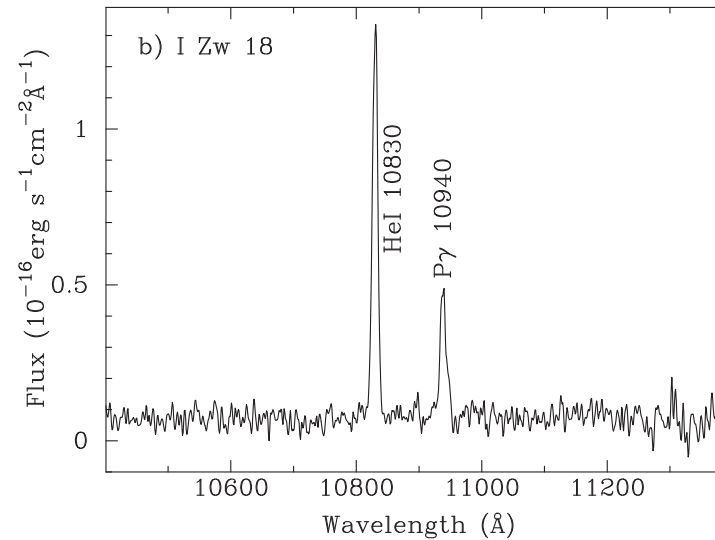
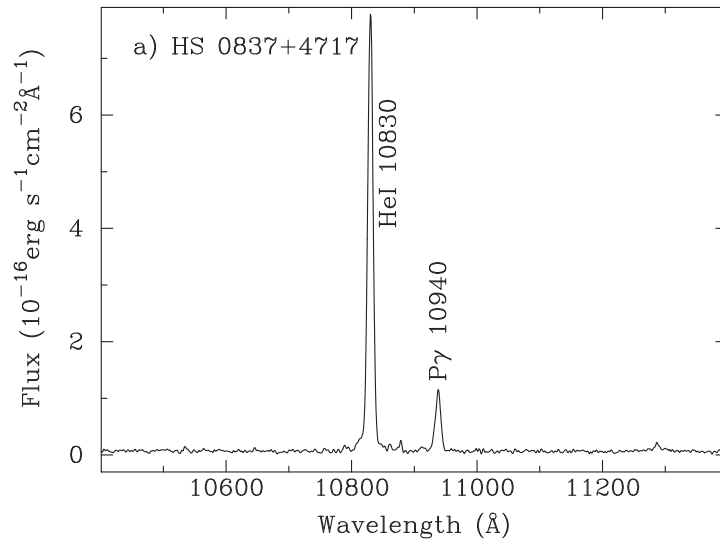
- Beobachtung von  $^2\text{D}$ -Absorptionslinien in Gaswolken
- Häufigkeit als Funktion des Alters, ausgedrückt als Anreicherung der Gaswolke in Sauerstoff O/H
- Fit und Extrapolation zu Null



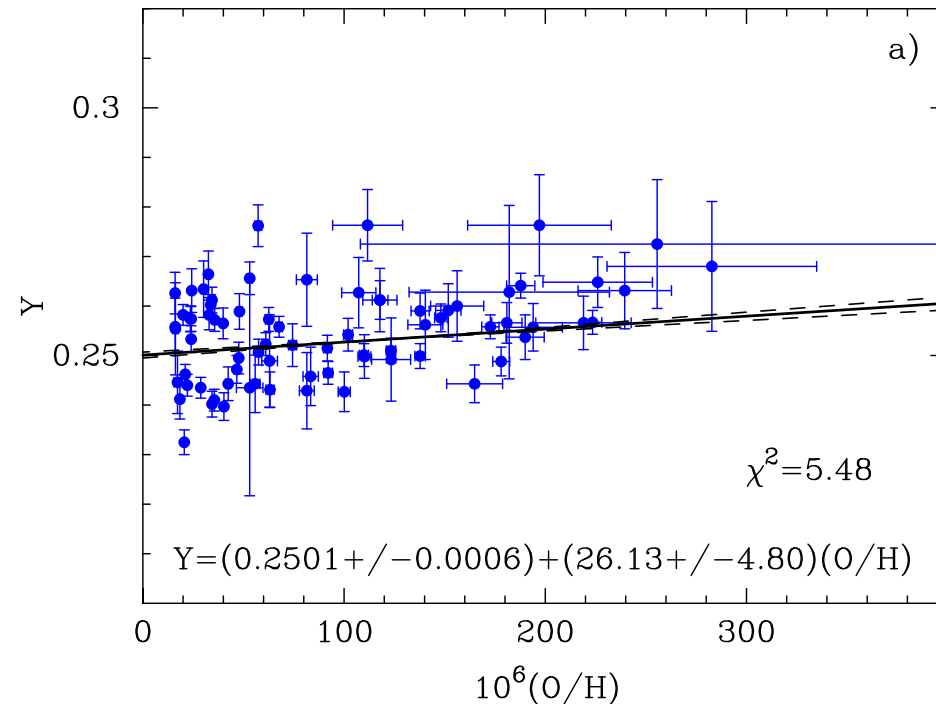
Cooke *et al.*, ApJ 2014







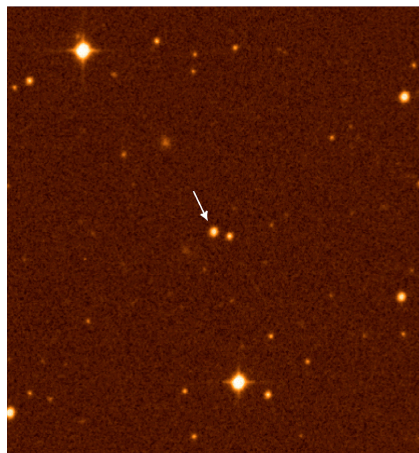
- Beobachtung von  $^4\text{He}$ -Emissionslinien in Gaswolken
- Häufigkeit als Funktion des Alters, ausgedrückt als Anreicherung der Gaswolke in Sauerstoff O/H
- Fit und Extrapolation zu Null





# Beobachtung von Nuklidhäufigkeiten: Das Lithium-„Plateau“

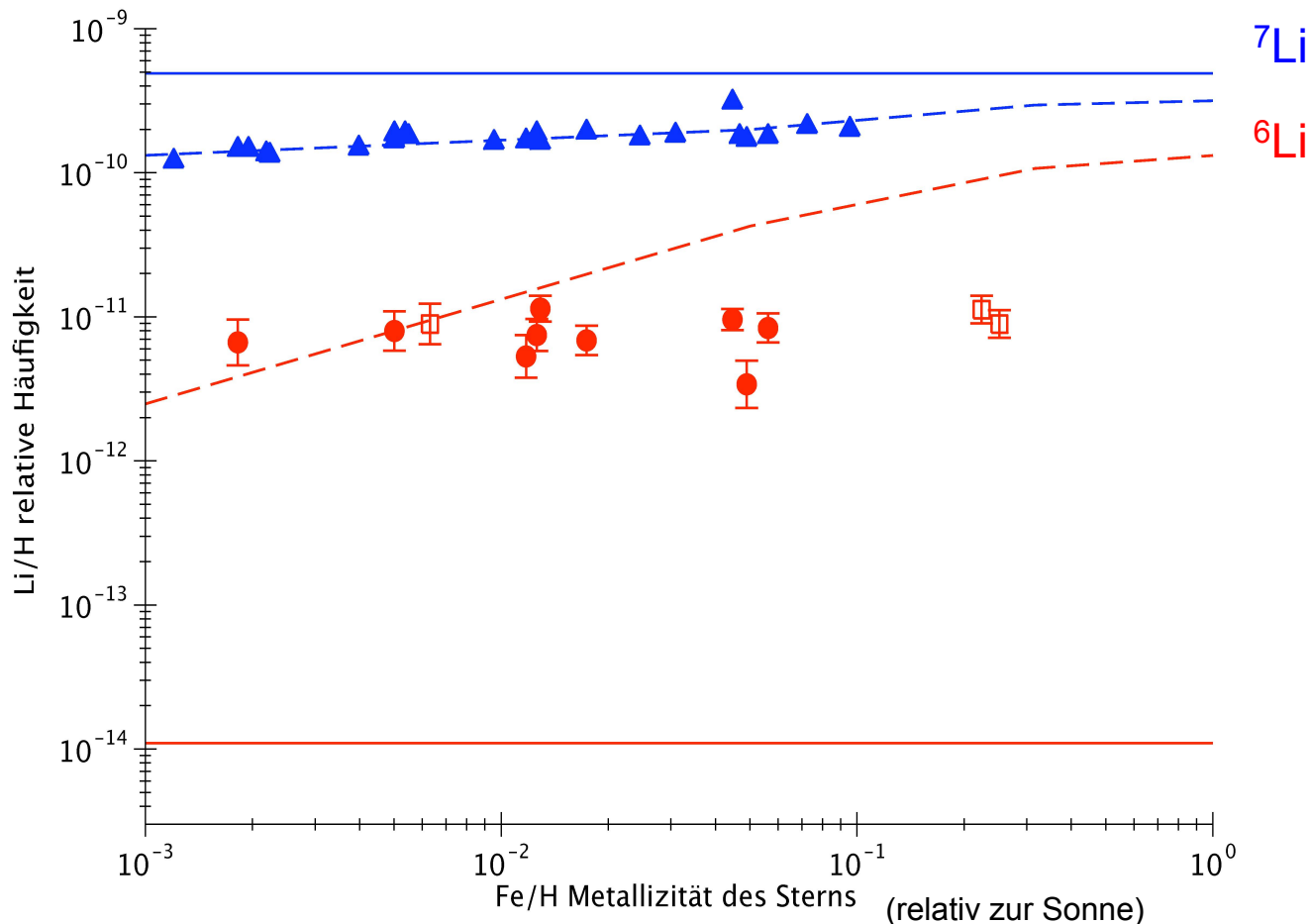
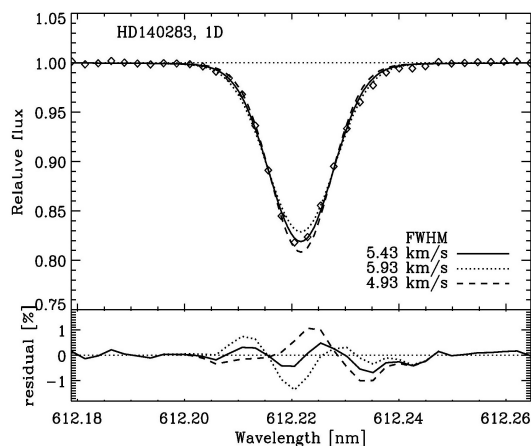
- Beobachtung von Absorptionslinien in sehr alten Sternen
- Darstellung als Funktion der Anreicherung in Kernen mit  $A > 7$
- Fitten und Extrapolation zu Alter Null
- Spite-Plateau



The Very Metal-Deficient Star HE 0107-5240

ESO PR Photo 25a/02 (30 October 2002)

© European Southern Observatory





# Kosmische Eintracht

1. Gelbe Box:  
 $^4\text{He}$ -Beobachtung

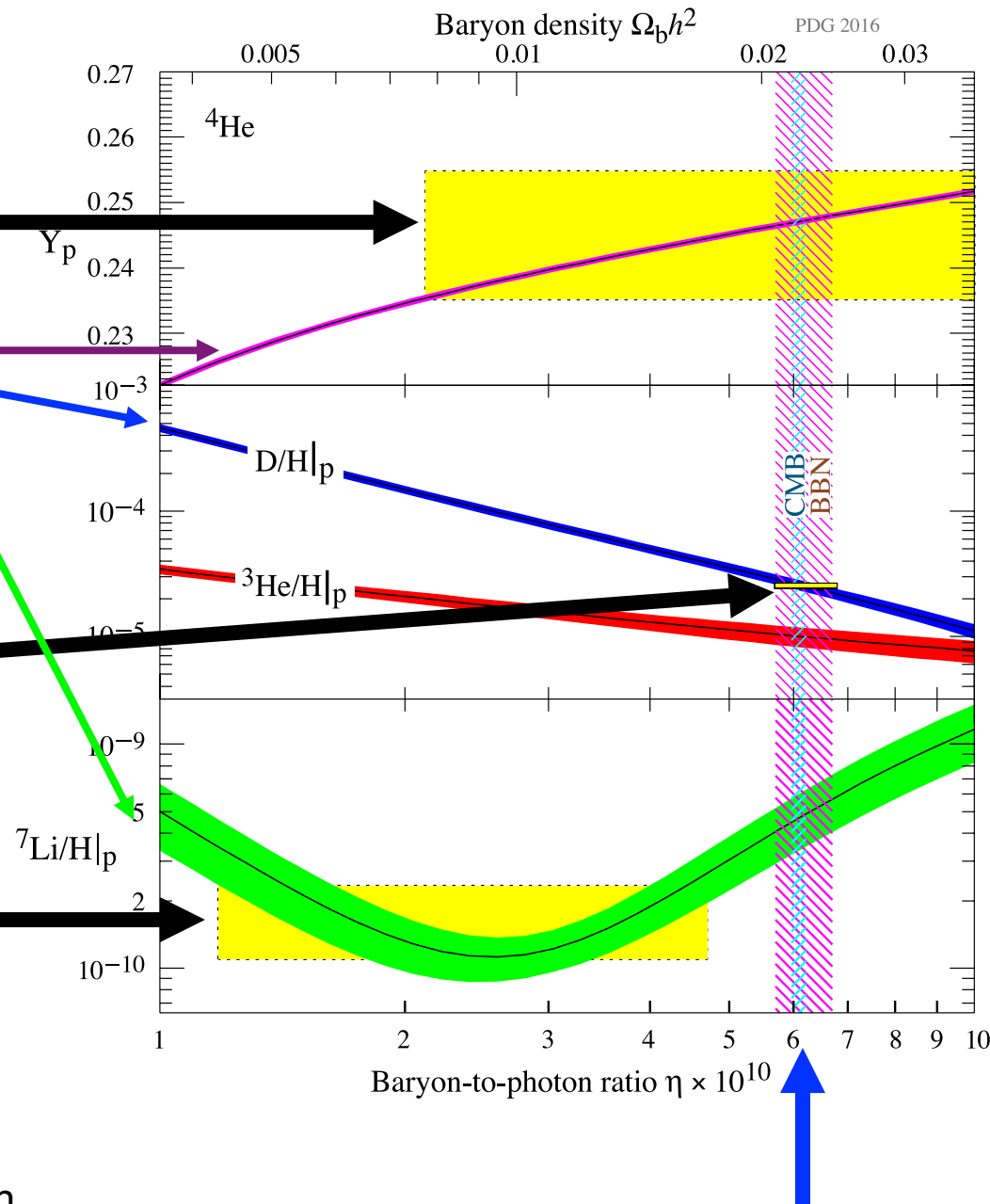
3. Lila/blau/grüne  
Bänder:  
BBN-Vorhersagen

1. Kleine gelbe Box:  
 $^2\text{H}$ -Beobachtung

1. Gelbe Box:  
 $^7\text{Li}$ -Beobachtung

Drei Aspekte sind in Übereinstimmung:

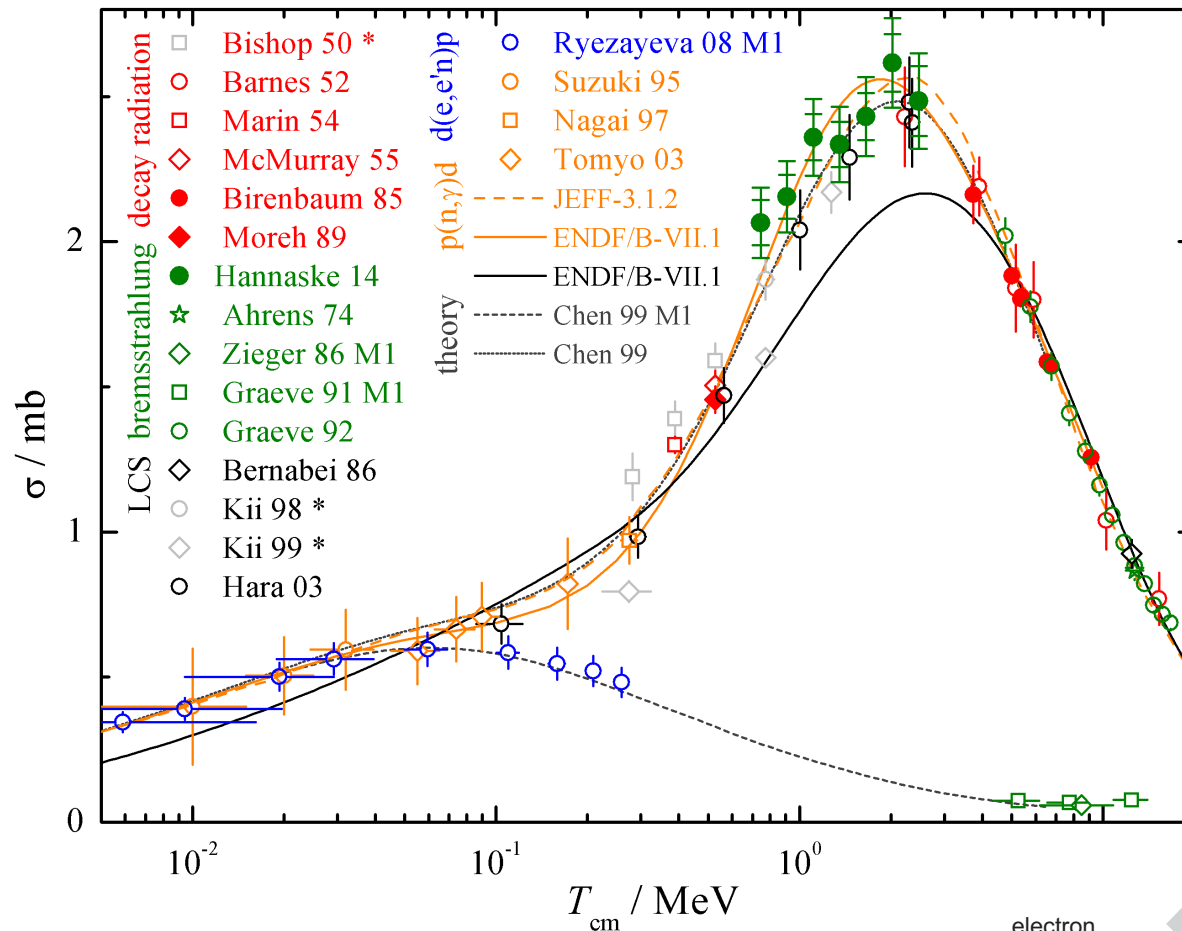
1. Beobachtete Nuklidhäufigkeiten
2. CMB-Wert für  $\eta$
3. BBN-vorhergesagte Nuklidhäufigkeiten



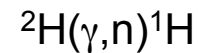
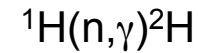
2. Blau schraffiert: CMB (Planck 2015)



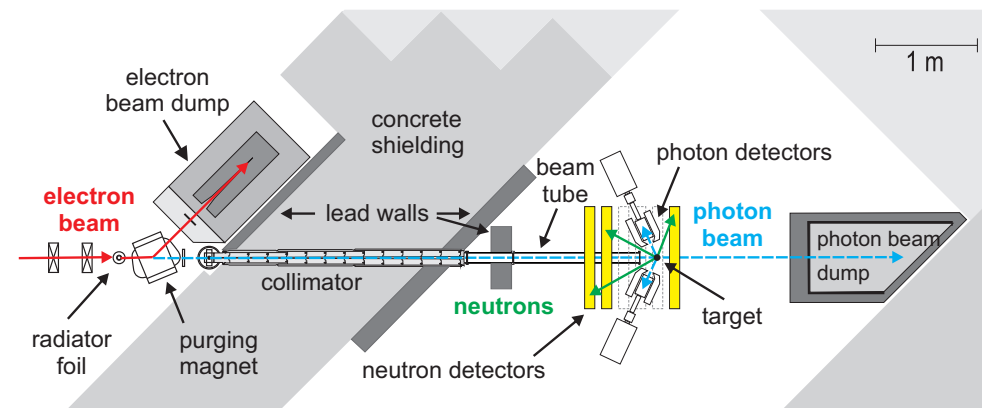
# Experiment am HZDR, $\gamma$ ELBE Bremsstrahlungs-Einrichtung



Photodissoziation des Deuterons, am Deuterium - Flaschenhals:

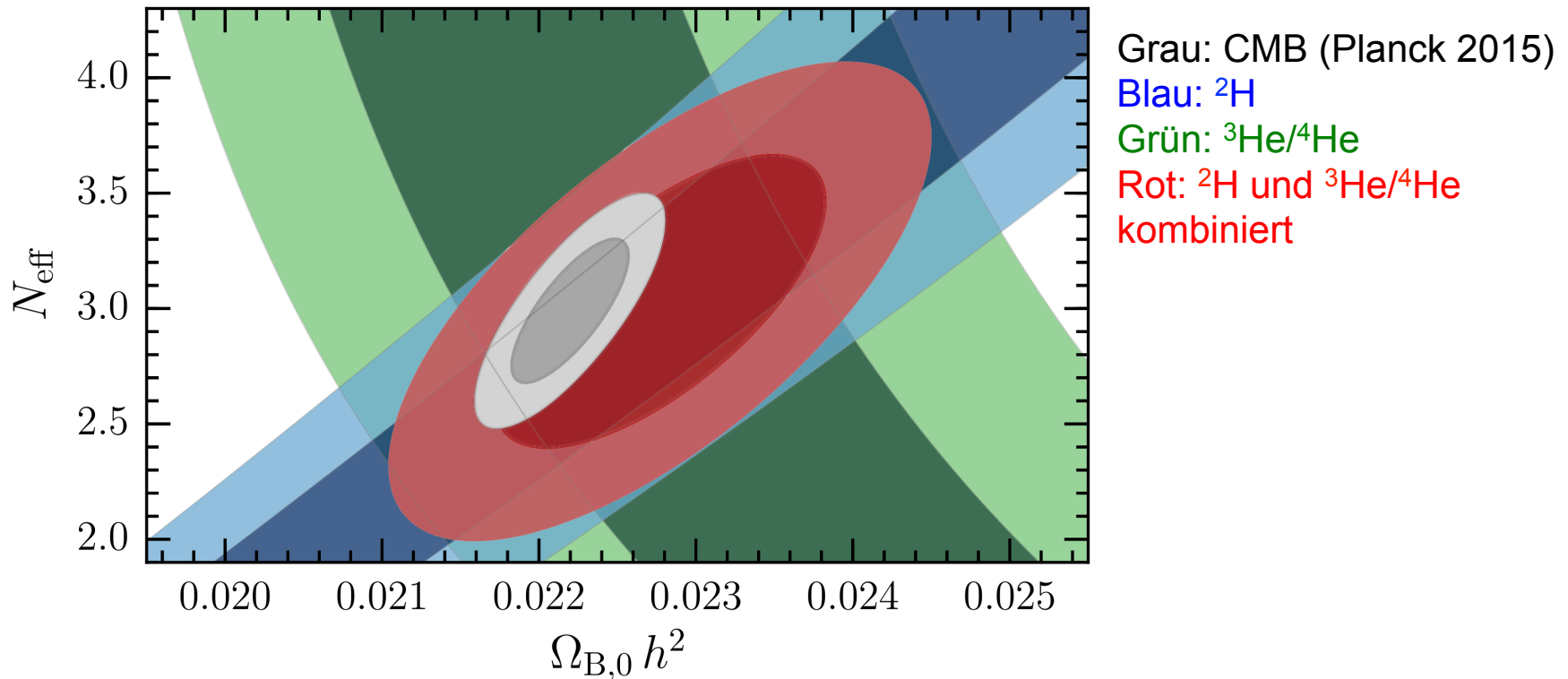


A. R. Junghans, R. Hannaske *et al.*





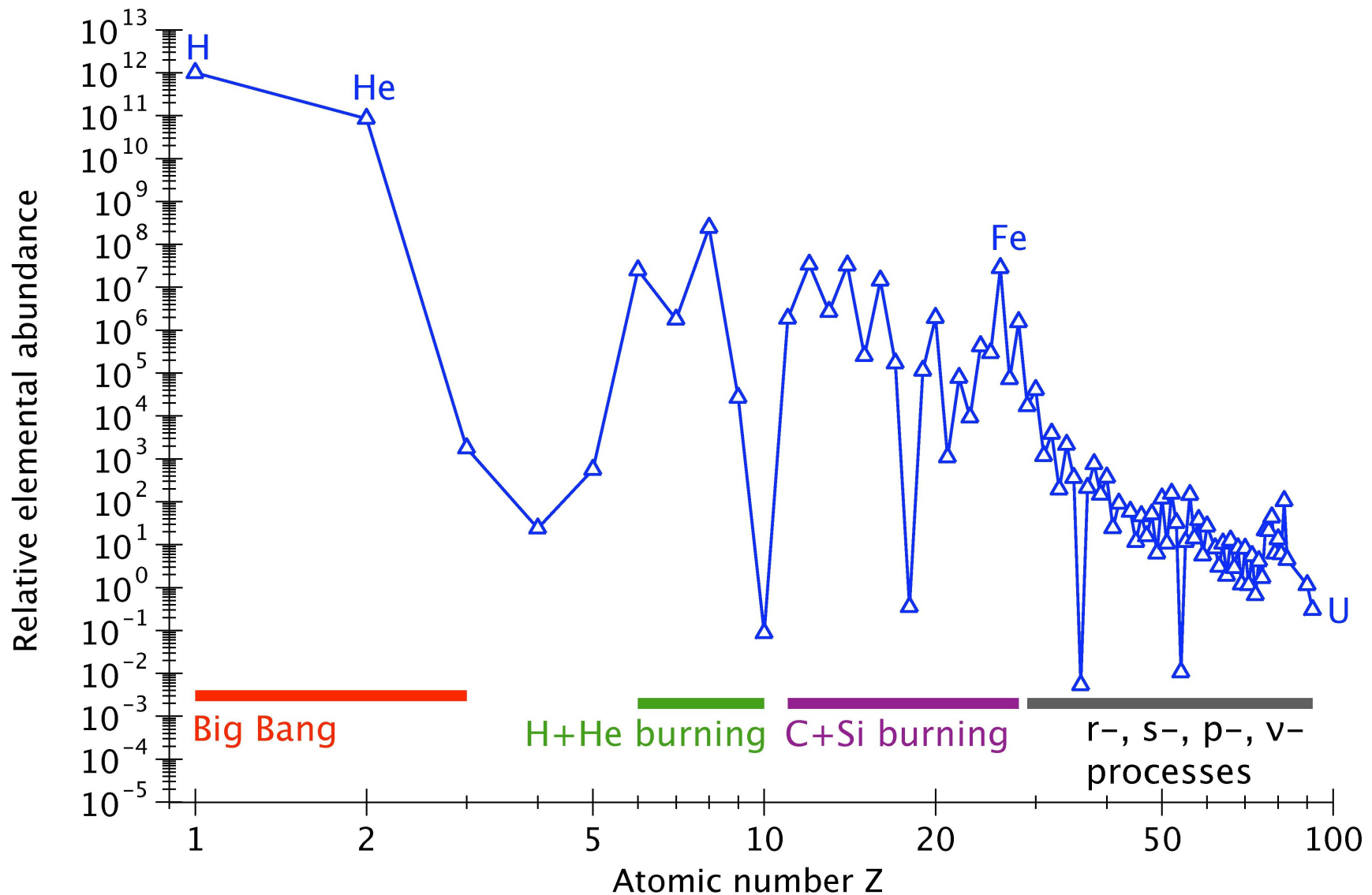
# Die ${}^2\text{H}(p,\gamma){}^3\text{He}$ - Reaktion, Zerstörung von ${}^2\text{H}$



1. Zur Zeit stimmen CMB (grau) und BBN (rot) perfekt überein.
2. Zur Zeit ist CMB (grau) genauer als BBN (rot).
3. Die Genauigkeit von BBN ist durch die  ${}^2\text{H}(p,\gamma){}^3\text{He}$  - Reaktion begrenzt.



# Was bedeutet die Urknall-Nukleosynthese für die Elemente um uns?





# Dresden, ehemalige Felsenkeller-Brauerei (Plauenscher Grund)

- ◆ Stollen VIII und IX werden für die Nukleare Astrophysik ausgebaut



- ◆ 5 MV -Ionenbeschleuniger
- ◆ Gebraucht (Privatfirma, York/UK)
- ◆ 250  $\mu$ A Ladestrom (2 Pelletketten)
- ◆ Cäsium-Sputterionenquelle: 100  $\mu$ A  $H^-$  und  $C^-$
- ◆ Gut geeignet für nukleare Astrophysik



## HZDR (Daniel Bemmerer et al.), TU Dresden (Kai Zuber et al.)

- ◆ Kernreaktionen in der Sonne
- ◆ Kohlenstoffbrennen in Supernovae Ia
- ◆ Urknall - Nukleosynthese
- ◆ Ausbildung von Studierenden
- ◆ Internationale Nutzer mit eigenen Projekten



# Urknall-Nukleosynthese (BBN)

## 3 Dinge zum Merken

- ◆ 3 Minuten nach dem Urknall
- ◆ 3 chemische Elemente: H, He, Li
- ◆ 3 beobachtete Häufigkeiten:  $^2\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$

## Aktuelles aus der Forschung

- ◆ Zur Zeit wird an genaueren  $^2\text{H}$ - und  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Beobachtungen für die BBN gearbeitet.
- ◆ Neue kernphysikalische Daten, insbesondere zur Zerstörung von  $^2\text{H}$ , können die Genauigkeit der Vorhersagen für die BBN entscheidend verbessern.
- ◆ Es gibt wahrscheinlich keine kernphysikalische Lösung für das kosmische  $^7\text{Li}$ -Problem.

