

# Primordiale Nukleosynthese und Baryogenese

## Das Universum als Fusionsreaktor

Marcel Kiel

CERN, LHCb  
ITA Heidelberg

06.11.2015

# Gliederung

- 1 Kosmologie
  - Die primordiale Nukleosynthese
- 2 Teilchenphysik
  - Die Baryogenese
- 3 Zusammenfassung

# Die Friedmann-Gleichungen

# Die Friedmann-Gleichungen

- Die Friedmanngleichung:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_0^2 \left[ \frac{\Omega_{r0}}{a^4} + \frac{\Omega_{m0}}{a^3} - \frac{\Omega_{k0}}{a^2} \right]$$

# Die Friedmann-Gleichungen

- Die Friedmanngleichung:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_0^2 \left[ \frac{\Omega_{r0}}{a^4} + \frac{\Omega_{m0}}{a^3} - \frac{\Omega_{k0}}{a^2} \right]$$

- Für das sehr frühe Universum gilt also:

$$\frac{\Omega_{k0}}{a^2} \ll \frac{\Omega_{m0}}{a^3} \ll \frac{\Omega_{r0}}{a^4}$$

# Das Mengenverhältnis von Strahlung zu Materie

# Das Mengenverhältnis von Strahlung zu Materie

- Photonendichte von  $\approx 405$  Photonen pro  $\text{cm}^3$

# Das Mengenverhältnis von Strahlung zu Materie

- Photonendichte von  $\approx 405$  Photonen pro  $\text{cm}^3$
- Baryondichte von  $\approx 2,5 \cdot 10^{-7}$  Baryonen pro  $\text{cm}^3$



# Das Mengenverhältnis von Strahlung zu Materie

- Photonendichte von  $\approx 405$  Photonen pro  $\text{cm}^3$
- Baryondichte von  $\approx 2,5 \cdot 10^{-7}$  Baryonen pro  $\text{cm}^3$
- $\implies 1,6 \cdot 10^9$  Photonen pro Baryon

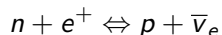
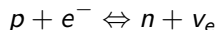
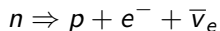
# Protonen und Neutronen im thermischen Gleichgewicht

# Protonen und Neutronen im thermischen Gleichgewicht

- $10^{-5}$  nach dem Urknall bei  $10^{13}\text{K}$

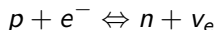
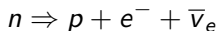
# Protonen und Neutronen im thermischen Gleichgewicht

- $10^{-5}$  nach dem Urknall bei  $10^{13}\text{K}$
- Reaktionen im Gleichgewicht



# Protonen und Neutronen im thermischen Gleichgewicht

- $10^{-5}$  nach dem Urknall bei  $10^{13}\text{K}$
- Reaktionen im Gleichgewicht



- Neutron/Proton-Verhältnis zum Ende des Gleichgewichts  $\approx 1/5$

# Die Deuterium-Fusion

# Die Deuterium-Fusion

- Hochenergetische Photonen zerstören die neuen Kerne

# Die Deuterium-Fusion

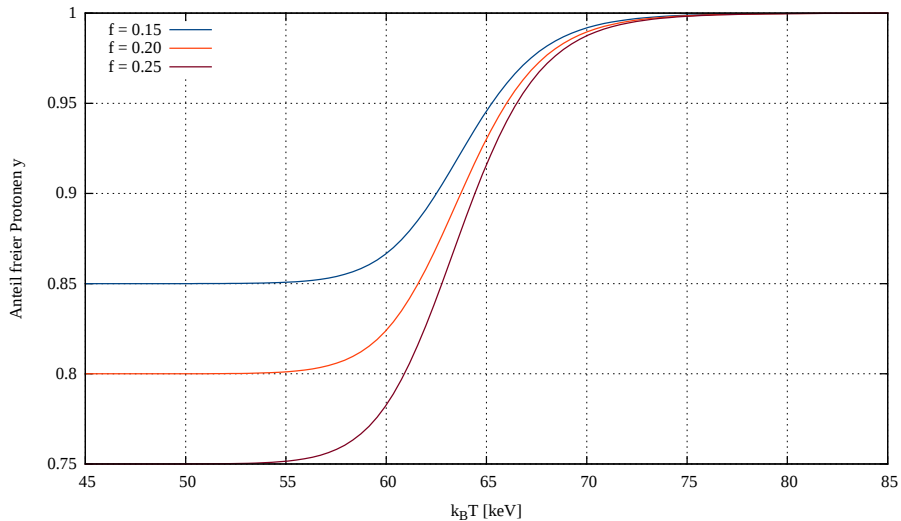
- Hochenergetische Photonen zerstören die neuen Kerne
- Temperatur muss sinken, gleichzeitig zerfallen immer mehr Neutronen



# Die Deuterium-Fusion

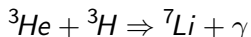
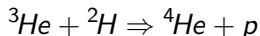
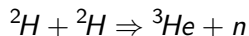
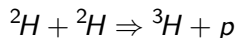
- Hochenergetische Photonen zerstören die neuen Kerne
- Temperatur muss sinken, gleichzeitig zerfallen immer mehr Neutronen
- Zum Zeitpunkt der möglichen Fusion ist  $N/P$  auf  $1/7$  gefallen

# Die Deuterium-Fusion



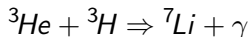
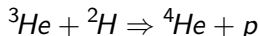
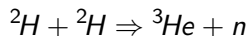
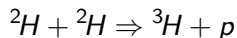
# Der Ursprung der schweren Elemente

- lediglich folgende Reaktionen während der Nukleosynthese möglich



# Der Ursprung der schweren Elemente

- lediglich folgende Reaktionen während der Nukleosynthese möglich



- Alle schwereren Elemente stammen aus Sternen

# Die Sacharowkriterien

# Die Sacharowkriterien

- Verletzung der Baryonenzahl-Erhaltung

# Die Sacharowkriterien

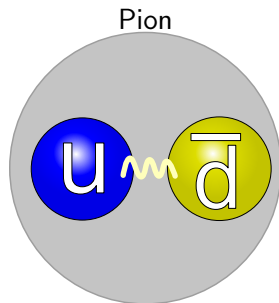
- Verletzung der Baryonenzahl-Erhaltung
- Verletzung von  $C$ - und  $CP$ -Invarianz

# Die Sacharowkriterien

- Verletzung der Baryonenzahl-Erhaltung
- Verletzung von  $C$ - und  $CP$ -Invarianz
- Thermodynamisches Nichtgleichgewicht

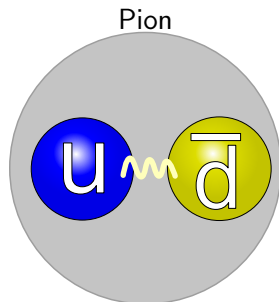


# Mesonen



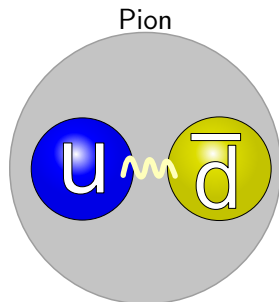
# Mesonen

- Aufgebaut aus einem Quark-Antiquark-Paar



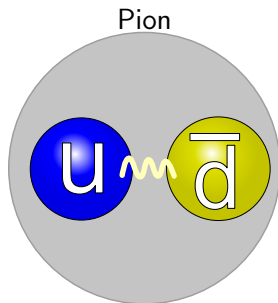
# Mesonen

- Aufgebaut aus einem Quark-Antiquark-Paar
- kommen nicht natürlich vor



# Mesonen

- Aufgebaut aus einem Quark-Antiquark-Paar
- kommen nicht natürlich vor
- zerfallen sehr schnell wieder



# Das $B_s$ -Mesonen

# Das $B_s$ -Mesonen

- Aufgebaut aus einem strange-antibottom-Quark-Paar

# Das $B_s$ -Mesonen

- Aufgebaut aus einem strange-antibottom-Quark-Paar
- Zerfallszeit rund  $(1,511 \pm 0,014) \cdot 10^{-12}$  Sekunden

# Das $B_s$ -Mesonen

- Aufgebaut aus einem strange-antibottom-Quark-Paar
- Zerfallszeit rund  $(1,511 \pm 0,014) \cdot 10^{-12}$  Sekunden
- Betrachtete Zerfallskanäle:

$$B_s \rightarrow K^- \pi^+$$

$$\bar{B}_s \rightarrow K^+ \pi^-$$



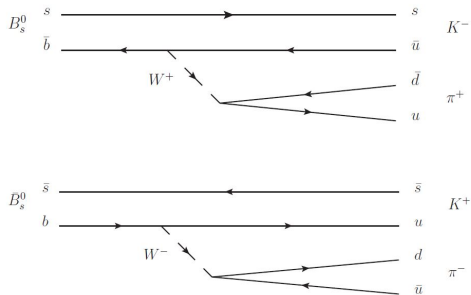
# Das $B_s$ -Mesonen

- Aufgebaut aus einem strange-antibottom-Quark-Paar
- Zerfallszeit rund  $(1,511 \pm 0,014) \cdot 10^{-12}$  Sekunden
- Betrachtete Zerfallskanäle:

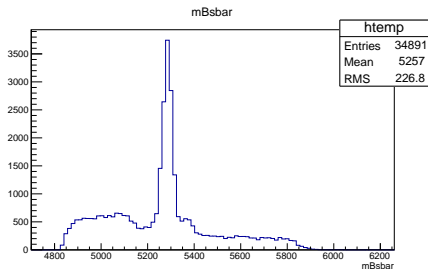
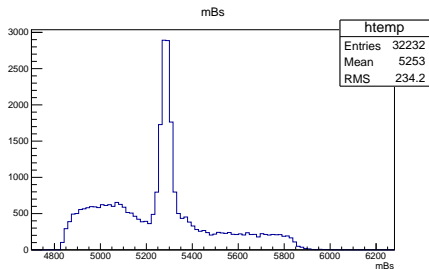
$$B_s \rightarrow K^- \pi^+$$

$$\bar{B}_s \rightarrow K^+ \pi^-$$

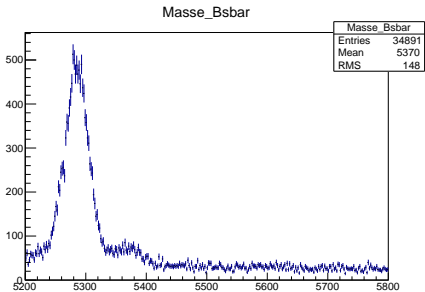
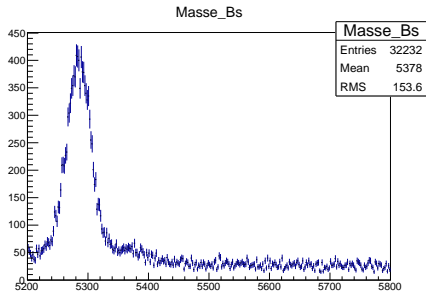
- Zerfall  $B_s$  und  $\bar{B}_s$



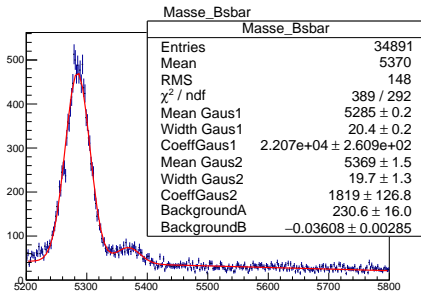
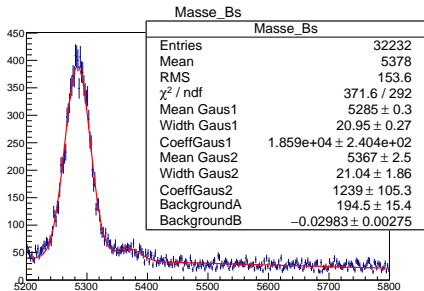
# Nachweis einer direkten $CP$ -Verletzung



# Nachweis einer direkten $CP$ -Verletzung



# Nachweis einer direkten $CP$ -Verletzung



# Nachweis einer direkten $\mathcal{CP}$ -Verletzung

- Berechnung der Asymmetrie des Zerfalls

$$A_{B_s // \bar{B}_s} = \frac{N(B_s) - N(\bar{B}_s)}{N(B_s) + N(\bar{B}_s)}$$

# Nachweis einer direkten $\mathcal{CP}$ -Verletzung

- Berechnung der Asymmetrie des Zerfalls

$$A_{B_s/\bar{B}_s} = \frac{N(B_s) - N(\bar{B}_s)}{N(B_s) + N(\bar{B}_s)}$$

- Anzahl der Ereignisse aus der fit-Funktion

$$N(B_s \rightarrow K^- \pi^+) = 619,3 \pm 52,6$$

$$N(\bar{B}_s \rightarrow K^+ \pi^-) = 909,7 \pm 63,3$$

# Nachweis einer direkten $\mathcal{CP}$ -Verletzung

- Berechnung der Asymmetrie des Zerfalls

$$A_{B_s//\bar{B}_s} = -0,189 \pm 0,056$$

# Nachweis einer direkten $CP$ -Verletzung

- Berechnung der Asymmetrie des Zerfalls

$$A_{B_s//\bar{B}_s} = -0,189 \pm 0,056$$

- Vergleich mit dem Ergebnis einer LHCb Veröffentlichung:

$$A_{B_s//\bar{B}_s} = 0,27 \pm 0,08$$



# Zusammenfassung

- Die Baryogenese ist die Grundlage für die Materie im Universum

## Ausblick

# Zusammenfassung

- Die Baryogenese ist die Grundlage für die Materie im Universum
- Prinzipiell mit dem Standardmodell vereinbar

## Ausblick

# Zusammenfassung

- Die Baryogenese ist die Grundlage für die Materie im Universum
- Prinzipiell mit dem Standardmodell vereinbar

## Ausblick

- zeigt möglicherweise einen Weg in Richtung neue Physik jenseits des Standardmodells

# Diskussion

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!