

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 ≈ 405 Photonen pro cm^3

Das Mengenverhältnis von Strahlung zu Materie

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

Das Mengenverhältnis von Strahlung zu Materie

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

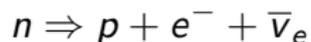
Protonen und Neutronen im thermischen Gleichgewicht

Protonen und Neutronen im thermischen Gleichgewicht

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

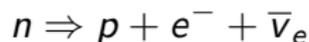
Protonen und Neutronen im thermischen Gleichgewicht

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



Protonen und Neutronen im thermischen Gleichgewicht

- 10^{-5} nach dem Urknall bei 10^{13}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

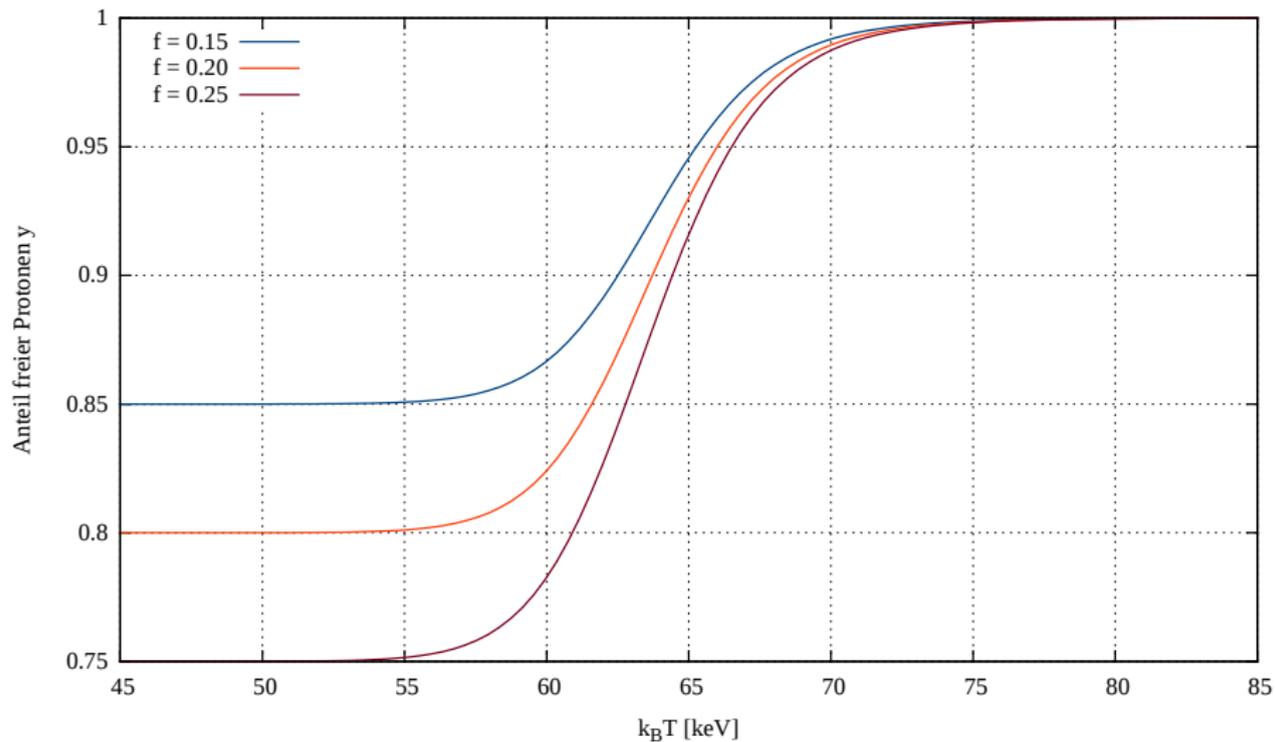
Die Deuterium-Fusion

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

Die Deuterium-Fusion

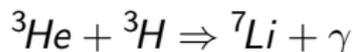
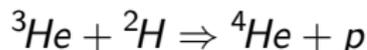
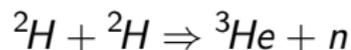
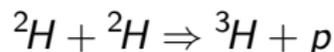
- Hochenergetische Photonen zerstören die neuen Kerne
- Temperatur muss sinken, gleichzeitig zerfallen immer mehr Neutronen
- Zum Zeitpunkt der möglichen Fusion ist N/P auf $1/7$ gefallen

Die Deuterium-Fusion



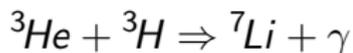
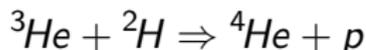
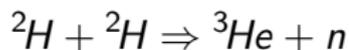
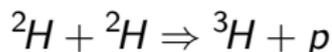
Der Ursprung der schweren Elemente

- 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

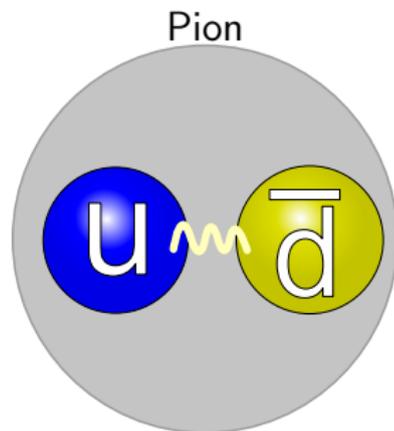
Die Sacharowkriterien

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

Die Sacharowkriterien

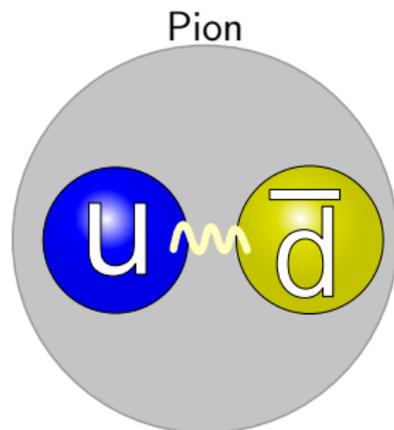
- Verletzung der Baryonenzahl-Erhaltung
- Verletzung von C - und CP -Invarianz
- Thermodynamisches Nichtgleichgewicht

Mesonen



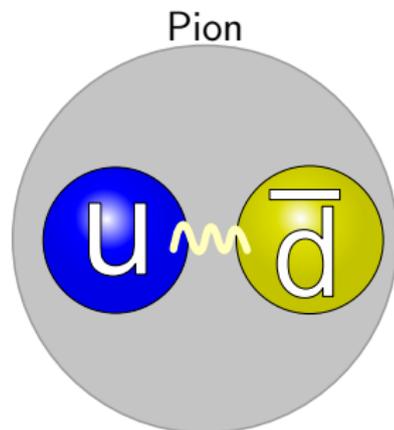
Mesonen

- Aufgebaut aus einem Quark-Antiquark-Paar



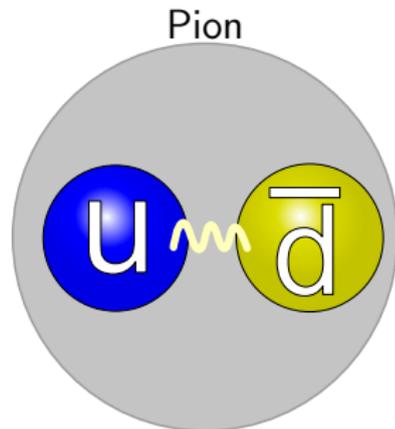
Mesonen

- 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:

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

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

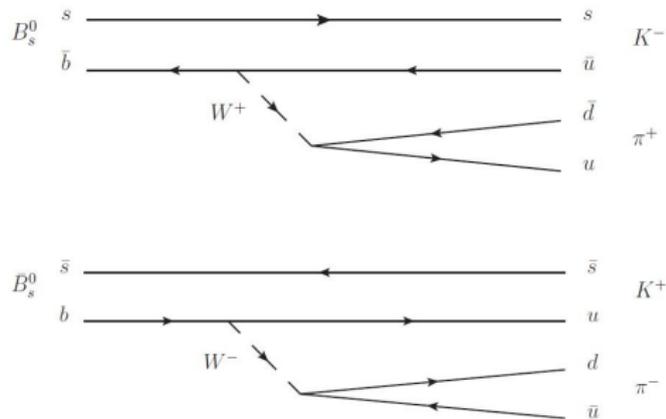
Das B_s -Mesonen

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

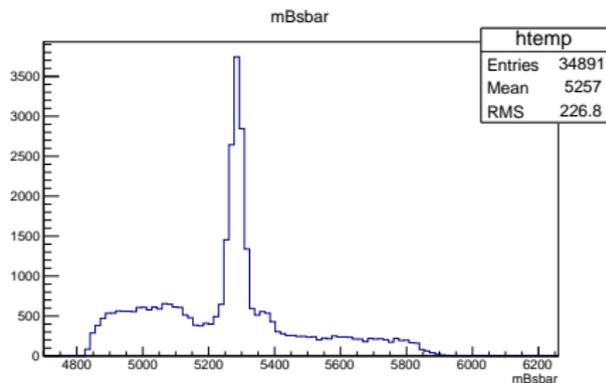
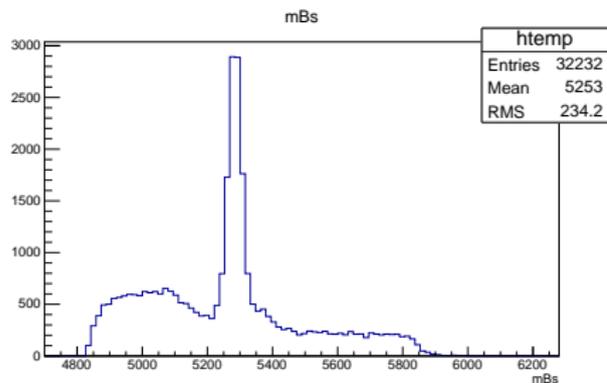
$$B_s \rightarrow K^- \pi^+$$

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

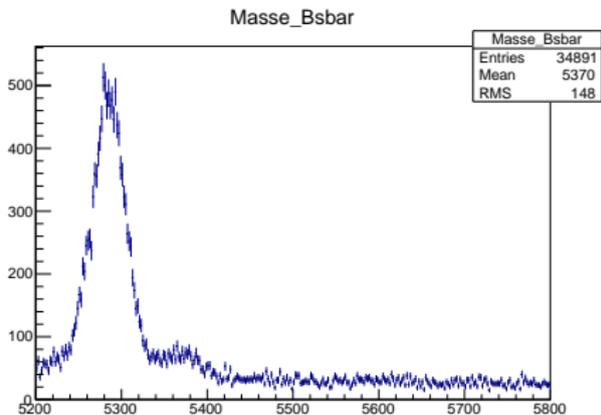
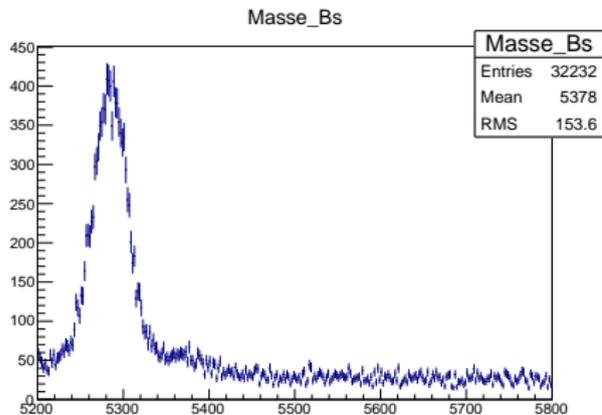
- Zerfall B_s und \bar{B}_s



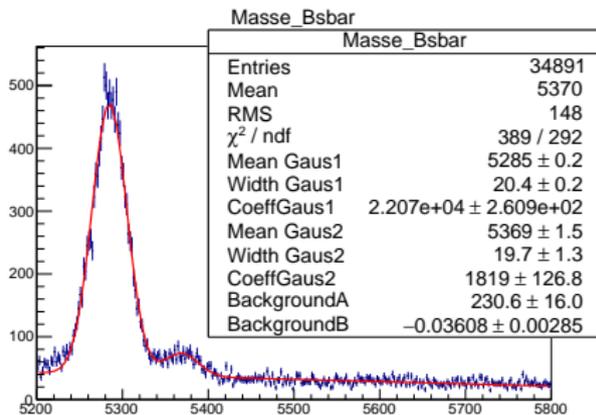
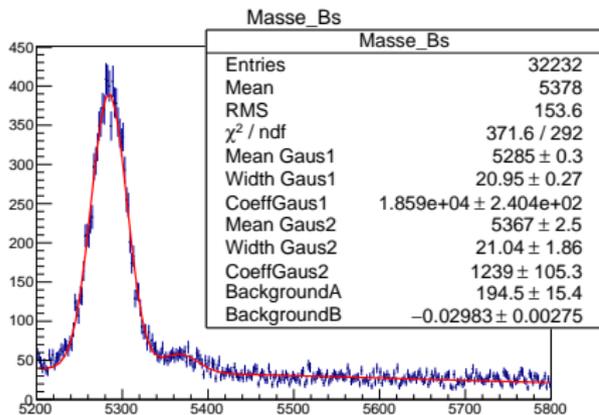
Nachweis einer direkten CP -Verletzung



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!