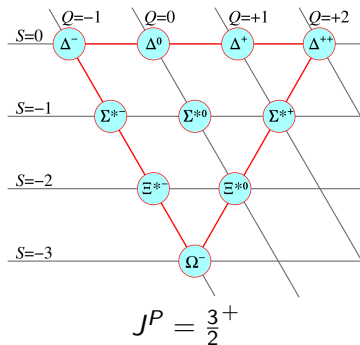
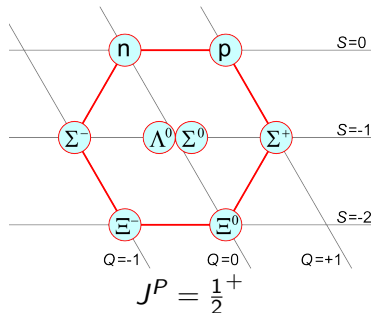


Физика барионов в эксперименте на коллайдере ВЭПП-6

Александр Бобров
ИЯФ

- ① Введение
- ② Изучение свойств барионов в сканировании по энергии
 - ① Электромагнитные свойства нуклонов
 - ② Конечные состояния с парами $B\bar{B}'$
- ③ Гипероны в распадах узких резонансов J/ψ , $\psi(2S)$
 - ① Поиск редких распадов
 - ② Измерение масс и времен жизни
 - ③ Измерение параметров асимметрии α распадов, CP-нарушение
- ④ Заключение

Основные состояния барионов, состоящих из легких кварков



$$u, d, s \text{ } SU_3$$

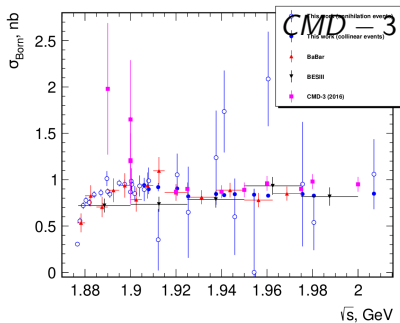
$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$$

Основные моды распадов гиперонов

	Λ	Σ^+	Σ^0	Σ^-	Ξ^0	Ξ^-	Ω^-
$c\tau$ см	7.8	2.4	0	4.4	8.7	4.9	2.4
	$p\pi^- \frac{2}{3}$ $n\pi^0 \frac{1}{3}$	$p\pi^0 \frac{1}{2}$ $n\pi^+ \frac{1}{2}$	$\Lambda\gamma$ 1	$n\pi^-$ 1	$\Lambda\pi^0$ 1	$\Lambda\pi^-$ 1	$\Lambda K \frac{2}{3}$ $\Xi^- \pi^0 \frac{1}{4}$ $\Xi^0 \pi^- \frac{1}{11}$

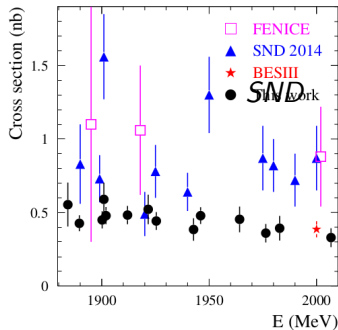
- 1 События с отлетами, распад вне места встречи
- 2 Реконструкция n из распадов гиперонов невозможна
- 3 Реконструкция p при больших скоростях $\beta \sim 0.3$ гиперонов
- 4 Реконструкция \bar{p} по аннигиляции

Изучение процессов e^+e^- аннигиляции в нуклоны на ВЭПП-2000



$$e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$$

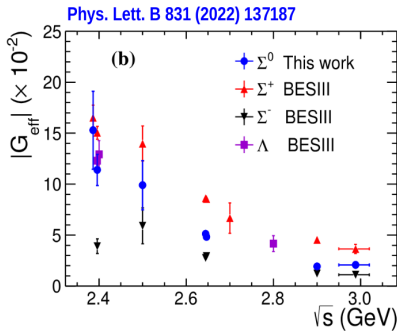
Д.Р. Иванов. Дипломная работа (маг). ИЯФ. 2025.



$$e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$$

Phys. Part. Nucl. **54** 4
624-629 (2023)

Электромагнитные свойства барионов



Взаимодействие барионов $\frac{1}{2}^+$ с электромагнитным полем описывается двумя факторами. Это комплексные функции s

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{C\alpha^2\beta}{4s} \left[|G_m|^2(1 + \cos^2 \Theta) + \frac{4M^2}{s} |G_e|^2 \sin^2 \Theta \right]$$

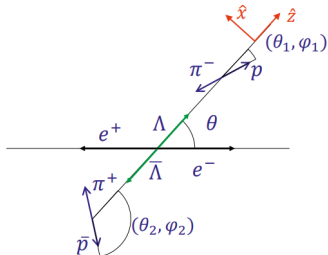
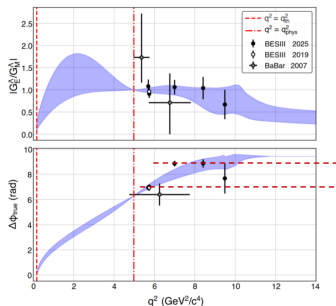
$$C = \frac{y}{1-e^{-y}}, \quad y = \alpha\pi\sqrt{1-\beta^2}/\beta \text{ заряженные}$$

$$C = 1 \quad \text{нейтральные}$$

Электромагнитные свойства гиперонов

распады гиперонов позволяют измерить фазу между формфакторами

\sqrt{s} ГэВ	2.3864	2.3960	2.6544	2.900	2.950	2.981	3.000	3.020	3.080
L пб $^{-1}$	22.6	66.9	67.8	105.5	16.0	16.0	15.8	17.3	126.6
T часы	1	3	3	2	0.3	0.3	0.3	0.3	2.5



arXiv:2506.08072

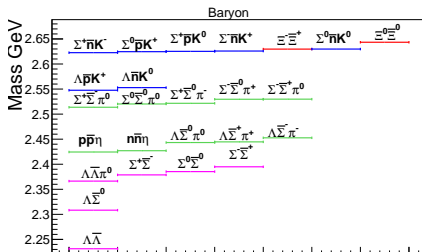
$$e^+ e^- \rightarrow \Lambda^0(s_1) + \bar{\Lambda}^0(s_2)$$

$$\Lambda^0(s_1) \rightarrow p\pi^-, \bar{\Lambda}^0(s_2) \rightarrow \bar{p}\pi^+$$

Phys.Rev.D 4 (1971) 2821,
 V. Thorén, Ph.D. thesis, Uppsala
 University (2022).

Изучение конечных состояний с парами $B\bar{B}^{(\prime)}$ вблизи порогов

- Множественные указания на усиление сечений вблизи порога ($e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}, p\bar{p}\gamma$ и д.р.)
- Большое количество порогов
- Хорошо работают нерелятивистские модели



- Есть возможность измерить тонкую структуру сечений рождения

Редкие распады гиперонов

1 Нарушение барионного и лептонного числа ($6 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-5}$)
 $\Lambda \rightarrow \pi^+ e^-$

2 Нарушение лептонного числа (тип C)

3 $\Delta S = \Delta Q$ ($5 \times 10^{-6} - 9 \times 10^{-4}$)
 $\Xi^0 \rightarrow \Sigma^- e^+ \nu_e$

4 $\Delta S = 1$ нейтральные токи ($1.08 \pm 0.17 \times 10^{-8}$) $\Sigma^+ \rightarrow p \mu^- \mu^+$ (тип A)

5 $\Delta S = 2$ и ($2.9 \times 10^{-6} - 1.3 \times 10^{-3}$)
 $\Omega^- \rightarrow \Lambda \pi^-$

6 $B \rightarrow B' \nu \bar{\nu}$ распады с парами нейтрино, темными фотонами и д.р. Тагирование гиперонов (тип B). В Стандартной модели $(6 \div 1) \times 10^{-13}$

Decay mode	Current data $\mathcal{B} (\times 10^{-6})$	Sensitivity $\mathcal{B} (90\% \text{ C.L.}) (\times 10^{-6})$	Type
$\Lambda \rightarrow \pi^+ e^-$	—	< 0.8	Type A
$\Sigma^+ \rightarrow p e^+ e^-$	< 7	< 0.4	
$\Xi^0 \rightarrow \Lambda e^+ e^-$	7.6 ± 0.6	< 1.2	
$\Xi^0 \rightarrow \Sigma^0 e^+ e^-$	—	< 1.3	
$\Xi^- \rightarrow \Sigma^- e^+ e^-$	—	< 1.0	
$\Omega^- \rightarrow \Xi^- e^+ e^-$	—	< 26.0	
$\Sigma^+ \rightarrow p \mu^+ \mu^-$	$(0.09^{+0.09}_{-0.08})$	< 0.4	
$\Omega^- \rightarrow \Xi^- \mu^+ \mu^-$	—	< 30.0	Type B
$\Lambda \rightarrow n \nu \bar{\nu}$	—	< 0.3	
$\Sigma^+ \rightarrow p \nu \bar{\nu}$	—	< 0.4	
$\Xi^0 \rightarrow \Lambda \nu \bar{\nu}$	—	< 0.8	
$\Xi^0 \rightarrow \Sigma^0 \nu \bar{\nu}$	—	< 0.9	
$\Xi^- \rightarrow \Sigma^- \nu \bar{\nu}$	—	—*	
$\Omega^- \rightarrow \Xi^- \nu \bar{\nu}$	—	< 26.0	
$\Sigma^- \rightarrow \Sigma^+ e^- e^-$	—	< 1.0	Type C
$\Sigma^- \rightarrow p e^- e^-$	—	< 0.6	
$\Xi^- \rightarrow p e^- e^-$	—	< 0.4	
$\Xi^- \rightarrow \Sigma^+ e^- e^-$	—	< 0.7	
$\Omega^- \rightarrow \Sigma^+ e^- e^-$	—	< 15.0	
$\Sigma^- \rightarrow p \mu^- \mu^-$	—	< 1.1	
$\Xi^- \rightarrow p \mu^- \mu^-$	< 0.04	< 0.5	
$\Omega^- \rightarrow \Sigma^+ \mu^- \mu^-$	—	< 17.0	
$\Sigma^- \rightarrow p e^- \mu^-$	—	< 0.8	
$\Xi^- \rightarrow p e^- \mu^-$	—	< 0.5	
$\Xi^- \rightarrow \Sigma^+ e^- \mu^-$	—	< 0.8	
$\Omega^- \rightarrow \Sigma^+ e^- \mu^-$	—	< 17.0	

Распад $\Sigma^+ \rightarrow p\mu^+\mu^-$

LHCb $1.08 \pm 0.17 \times 10^{-8}$ 237 evts

Phys. Rev. Lett. 135, 051801

Измеренные вероятности остальных редких распадов гиперонов лежат в диапазоне 10^{-4} - 10^{-6} . Редкие распады D , B мезонов, τ лептонов изучены гораздо лучше, чем распады гиперонов.

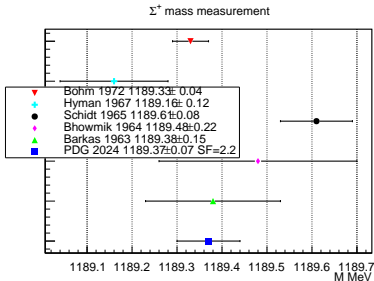
Год работы на резонансах $N/10^7$ рожденных гиперонов

	Λ	Σ^+	Σ^0	Σ^-	Ξ^0	Ξ^-	Ω^-
J/ψ	82	51	23	24	23	20	
$\psi(2S)$	2.2	1.6	0.9	1.5	0.9	1.2	0.22

Чувствительность на ВЭПП-6 $10^{-8} - 10^{-7}$ $S=1,2$; 10^{-5} Ω^-

Измерение масс гиперонов

- 1 Большинство измерений проведено в XX веке
- 2 Абсолютная точность измерений 6 - 600 кэВ
- 3 Измерения проводились на очень ограниченной статистике
- 4 Набор в пиках J/ψ , $\psi(2S)$

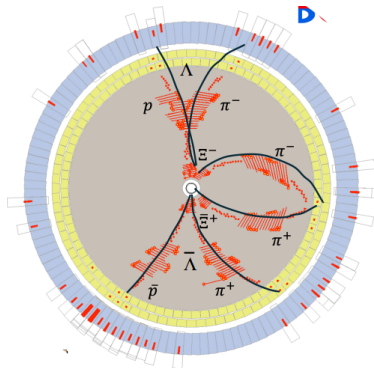


барион	средняя точность кэВ	лучшее измерение кэВ	год	событий
Λ	6	6	94	20k
Σ^+	70	40	72	607
Σ^0	24	24	97	3327
Σ^-	29	40	93	
Ξ^-	70	94	06	2478
Ξ^0	200	200	00	3120
Ω^-	290	600	78	27

CP-нарушение в распадах гиперонов

PRL 132, 101801 (2024) (BES-III)
 $10^{10} J/\psi$

$$\begin{aligned}A_{CP}^{\Xi} &= -0.009 \pm 0.008^{+0.007}_{-0.002} \\ \Delta\phi_{CP}^{\Xi} &= -0.003 \pm 0.008^{+0.003}_{-0.007} \\ A_{CP}^{\Lambda^-} &= -0.007 \pm 0.008^{+0.005}_{-0.007} \\ A_{CP}^{\Lambda^0} &= 0.001 \pm 0.009^{+0.003}_{-0.004} \\ \xi_P^{\Xi} - \xi_S^{\Xi} &= 0.007 \pm 0.020^{+0.018}_{-0.005}\end{aligned}$$



В CM $\xi_P^{\Xi} - \xi_S^{\Xi} = -10^{-4} \pm 10^{-4}$
Чувствительность на ВЭПП-6 5×10^{-3}

- 1 Изучение электромагнитной структуры барионов
 - 2 Изучение редких распадов гиперонов
 - 3 Измерение масс гиперонов
 - 4 Исследование конечных состояний вблизи порогов с парами $B\bar{B}^{(\prime)}$
 - 5 CP-нарушение в распадах гиперонов
- 1 Для более детальной проработки физической программы необходимо полное моделирование