Search for Polarized Phenomena at Nuclotron using polarized beam and target

Шиндин Роман

ВОПРОСЫ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ФИЗИКИ ЛЁГКИХ ЯДЕР

> Июль 26-29, 2022 ПИЯФ, Гатчина

Contents

Delta-Sigma experiment

Polarized Proton Target $\vec{d}/\vec{n}/(^3\vec{He})$ extracted beam Spectrometer

$\Delta \sigma ++$

Detector for Target Surrounding "COSY" program

Measurement of ³He-polarization

Lyuboshits method Analizing power of ${}^{3}\mathrm{He}+\mathrm{p} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He}+\pi^{+}$ reaction Neutron Second-Hand

Приложение

 $\Delta \sigma$ - experiment

Начало проекта Дельта-Сигма — 1990 г. Задача — измерить наблюдаемые $\Delta\sigma_L({\rm np})$ и $\Delta\sigma_T({\rm np})$ — разности полных сечений при параллельном и антипараллельном состоянии спинов нейтрона и протона, маркеры L и T — направление поляризации спинов частиц пучка и мишени в продольном и поперечном направлениях.

Основная цель — прямое восстановление (DRSA) трёх амплитуд упругого NN-рассеяния под нулём градусов. Для полного комплекта данных необходимо также измерить коэффициенты спиновых корреляций $A_{00kk}(np)$ и $A_{00nn}(np)$. Шесть наблюдаемых ($\sigma_{0\,tot}(np)$ и $d\sigma/dt_{np\to np}$ известны) позволят найти три вещественные и три мнимые части NN-амплитуд.

- С. М. Биленький, Л. И. Лапидус, Р. М. Рындин, Поляризованная протонная мишень в опытах с частицами высоких энергий, УСП. ФИЗ. НАУК. 1964. Октябрь. Т. 84. С 243–301.
 - J. Bystrycky, F. Lehar, P. Wintrenitz Formalizm of nucleon-nucleon elastic scattering experiments, Le Journal de Physique. 1978. V. 39, № 1. P. 1–32.
- F. Lehar et al. Measurement of the spin dependent neutron-proton total cross section differences $\Delta\sigma_{\rm T}$ and $\Delta\sigma_{\rm L}$ between 0.63 and 1.08 GeV, Phys. Lett. 1987. 30 April. V. B, N^a 189. P. 241–244.

$$\begin{split} \sigma_{\rm tot} \; &=\; \sigma_0 \; - \; \frac{1}{2} \Delta \sigma_{\rm L} (\vec{\rm e} \vec{\rm P}_{\rm n}) (\vec{\rm e} \vec{\rm P}_{\rm p}) \; - \; \frac{1}{2} \Delta \sigma_{\rm T} (\vec{\rm e} \times \vec{\rm P}_{\rm n}) (\vec{\rm e} \times \vec{\rm P}_{\rm p}) \, , \\ \Delta \sigma_{\rm L} &=\; \sigma (\leftrightarrows) - \sigma (\rightrightarrows) \, , \quad \Delta \sigma_{\rm T} = \; \sigma (\uparrow \downarrow) - \sigma (\uparrow \uparrow) \, . \end{split}$$

 \vec{e} – единичный вектор импульса налетающей частицы , $\vec{P}_{n,p}$ – вектора поляризации нейтрона и протона .

$$\begin{split} & {\rm Im}\, {\rm a}(0) & = - \frac{{\rm k}}{4\pi}\, \sigma_0 \; , \\ & {\rm Im}\, {\rm b}(0) & = - {\rm Im}\, {\rm e}(0) = - \frac{{\rm k}}{8\pi} \Delta \sigma_{\rm T} \; , \\ & {\rm Im}\, {\rm f}(0) & = - \frac{{\rm k}}{8\pi} \Delta \sigma_{\rm L} \; . \end{split}$$

Мишень с замороженными спинами - МРТ



Энергозависимость $\Delta \sigma_{ m L}({ m np})$



Энергозависимость разности полных сечений $\Delta\sigma_L=\sigma(\rightrightarrows)-\sigma(\rightleftharpoons)$ взаимодействия нейтрона и протона с параллельным и антипараллельным состоянием спинов. Особенность возле $\mathsf{T}_n=1.8\,\mathsf{\Gamma}$ эВ может быть связана с фазовым переходом двух нуклонов в конфигурацию из шести кварков.

Нейтронный канал

Первичный пучок дейтронов из Нуклотрона:

$$I_d \sim 2 \times 10^{10} \, d/\text{цикл} \,, \quad \overline{P}_d \text{ up to } 7.5 \, \Gamma \textbf{\tiny{9B/c}} \,, \quad \frac{\sigma P_d}{P_d} \sim 0.1 \, \% \,.$$

Магнит M поворачивает d-пучок на мишень стриппингатор BT. Магнит SM служит для отклонения дейтронов и протонов в ловушку beam dump. Нейтроны от реакции развала $d \to p+n$ направляются в область коллиматора C1, C2 ($\varnothing=40$ и 30 мм, железо) и C3, C4 ($\varnothing=28$ и 25 мм, бронза). Общая длина коллиматора L ~7.6 м.

Характеристики пучка нейтронов



Профили n-пучка на выходе коллиматора C1, …, C4 и в области H_2/D_2 -мишени. Справа — изображение фотопластинки, экспонированной на пучке нейтронов.

Гало пучка: $\sigma \sim 1.2$ см, разброс по углам вылета: $\sigma \theta \sim 2$ мрад.

Импульсный спектр пучка нейтронов

$$\mathrm{np} \rightarrow \mathrm{pn} \left(\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{0} \right) \, \Rightarrow \, \mathrm{P}_{\mathrm{n}} \approx \mathrm{P}_{\mathrm{p}} \; .$$



Спектры импульсов протонов перезарядки $np \rightarrow pn$ при $\mathsf{T}_n = 0.8$ и 2.0 ГэВ.

Ширина спектра: $\Delta P \approx 4\%$.

Схема спектрометра, 2005-07 г.



$$\mathrm{Tr} \,=\, \overline{\mathrm{A}} \wedge (\mathrm{Gx} \vee \mathrm{Gy}) \wedge \mathrm{S1} \wedge \mathrm{ST1,2,3}\,,$$

$$\begin{split} \Delta \theta_{\rm x} &= 50 \, \text{mpag} \,, \quad \Delta \theta_{\rm y} = 12 \, \text{mpag} \,, \\ \sigma \theta &\approx 0.8 \, \text{mpag} \,, \quad \frac{\sigma P}{P} \approx 0.7 \, \% \,. \end{split}$$

Analyzing magnet SP-94 & Cryogenic equipment



Superconductor coils for T-mode (need change)



2017 г. — в ЛВФЭ заработал новый источник поляризованных дейтронов на базе оборудования CIPIOS, привезённого из США, 2007 г.

```
Полученная в 55-м сеансе поляризация P(+)\sim 0.67,\ P(-)\sim 0.46. Ожидаемая интенсивность \sim 10^{11}\,\vec{d}/цикл.
```

Можем !!!

измерить (повторить) наблюдаемые: $\Delta\sigma_L(np), \, \Delta\sigma_T(np), \, A_{00kk}(np)$ и $A_{00nn}(np)$ с шагом 50 МэВ в области $\mathsf{T}_n=1.8$ ГэВ провести процедуру DRSA и проверить фазовый переход $NN\to 6q$ методом диаграмм Аргана.

$\Delta \sigma ++$ equipment & program

Detector for Target Surrounding



$$\begin{split} \mathrm{nd} &\to {}^{3}\mathrm{He}\,\pi^{-}\,, \qquad \mathrm{nd} \to \mathrm{T}\,\pi^{0}\,, \qquad \mathrm{nd} \to \mathrm{T}\,\eta\,, \\ &\mathrm{nd} \to \mathrm{T}\,\pi^{+}\pi^{-}\,, \qquad \mathrm{nd} \to \mathrm{T}\,\mathrm{K}^{+}\mathrm{K}^{-}(\varphi)\,, \\ &\mathrm{dd} \to {}^{4}\mathrm{He}\,\pi^{0}\,, \qquad \mathrm{dd} \to {}^{4}\mathrm{He}\,\mathrm{X}^{0}\,, \qquad \mathrm{dd} \to {}^{4}\mathrm{He}\,\eta\,. \end{split}$$

Измерение поляризации пучка ³Не

The process ${}^{3}He + p \rightarrow {}^{4}He + \pi^{+}$ on the polarized hydrogen as an analyzer of the ${}^{3}He$ polarization

V.L.Lyuboshitz, JINR, Dubna

ABSTRACT

The cross-section dependence of the process ${}^{3}He + p - {}^{4}He + \pi^{+}$ on the ${}^{3}He$ and proton polarization vectors is investigated. It is shown that the reaction $p({}^{3}He, {}^{3}He)\pi^{+}$ on the oblarized hydrogen target can be used for measuring ${}^{3}He$ polarization.

Правило 1.

$${}^{3}ec{\mathrm{He}} + ec{\mathrm{p}}
ightarrow {}^{4}\mathrm{He} + \pi^{+} \hspace{0.2cm} \Rightarrow \hspace{0.2cm} rac{1}{2} + rac{1}{2}
ightarrow 0 + 0$$

 π^+ — псевдоскалярная частица — система ${}^4{\rm He} + \pi^+$ нечётная, поэтому фермионы ${}^3{\rm He}$ и р должны быть в антисимметричном P-состоянии, т.е. их спиновая функция может быть только триплетной !!! Если $\vec{\rm P}_1$ и $\vec{\rm P}_2$ — поляризации ${}^3{\rm He}$ и протона, а $\vec{\rm l}$ — вектор импульса ${}^3{\rm He}$, то вероятности проекций спина S_l = -1, 0 и -1 таковы:

$$\begin{split} \mathbf{w}_{\pm 1}^{(t)} &= \quad \frac{1}{4} (1 \pm \vec{P}_1 \vec{l}) (1 \pm \vec{P}_2 \vec{l}) \\ \mathbf{w}_0^{(t)} &= \quad \frac{1}{4} (1 + \vec{P}_1 \vec{P}_2 - 2(\vec{P}_1 \vec{l}) (\vec{P}_2 \vec{l})) \end{split}$$

Метод Любошица

Правило 2.

Если импульс ^{4}He параллелен импульсу ^{3}He , по закону сохранения углового момента состояний $S_{1}=+1$ и -1 не могло быть. Рассеяние forward (backward) может происходить только при $S_{1}=0.$

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}}{\mathrm{d}\boldsymbol{\Omega}}(0) = \left(\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}}{\mathrm{d}\boldsymbol{\Omega}}(0)\right)_{\mathrm{unpol}} \left[1 + \vec{\mathrm{P}}_1\vec{\mathrm{P}}_2 - 2(\vec{\mathrm{P}}_1\vec{\mathrm{l}})(\vec{\mathrm{P}}_2\vec{\mathrm{l}})\right]$$

Пусть \vec{P}_1 и \vec{P}_2 перпендикулярны \vec{l} , тогда:

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega}(0) = \left(\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega}(0)\right)_{\mathrm{unpol}} \left(1 + \vec{\mathrm{P}}_1\vec{\mathrm{P}}_2\right)$$

Из состояний $\uparrow\uparrow$ и $\uparrow\downarrow$ следует асимметрия:

$$\eta \ = \ \frac{\frac{\mathrm{d}\sigma^{\uparrow\uparrow}}{\mathrm{d}\Omega}(0) - \frac{\mathrm{d}\sigma^{\uparrow\downarrow}}{\mathrm{d}\Omega}(0)}{\frac{\mathrm{d}\sigma^{\uparrow\uparrow}}{\mathrm{d}\Omega}(0) + \frac{\mathrm{d}\sigma^{\uparrow\downarrow}}{\mathrm{d}\Omega}(0)} \ = \ \mathrm{P}_1 \, \mathrm{P}_2$$

Дифф. сечение реакции мало — 15 μ b/sr при $T_{kin} = 1.25$ ГэВ Интенсивность пучка 3 He — 10^{7} с растяжкой в 10 секунд Плотность атомов водорода MPT — 10^{23} /см² Поляризация MPT — 90 %

150 событий за цикл — 5 % точность за 20 минут

Другой простой способ





Secondary neutrons are polarized by 86 %.

F3-polarimeter

Focus 3



F3-polarimeter



F3-polarimeter



Data RUNs 1–167, 24–27.02.2017

$$P_d = 7.5 \text{ GeV/c} \Rightarrow P_p \sim 3.75 \text{ GeV/c}$$

Angles $\alpha = 9^\circ$, $\beta = 68^\circ \Rightarrow A_y(H_2) \cong 0.2$





RUNs	Tar	$P_z(+)$	$P_z(-)$
35–62	CH_2	$+0.642 \pm 0.008$	-0.508 ± 0.007
63–69	CH_2	$+0.644 \pm 0.011$	-0.497 ± 0.009
71–78	CH_2	$+0.656 \pm 0.012$	-0.519 ± 0.01
80–89	CH_2	$+0.648 \pm 0.011$	-0.522 ± 0.009
90-141	CH_2	$+0.632 \pm 0.008$	-0.515 ± 0.007
152-164	CH_2	$+0.746 \pm 0.01$	-0.567 ± 0.009

Spin $\frac{1}{2}$ & Space

Eigenvectors of Pauli operator $(\hat{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \vec{\mathbf{r}})$



 $\sigma_{\rm r} = (\widehat{\sigma} \cdot \vec{r}) = \sigma_{\rm x} \sin \theta \cos \phi + \sigma_{\rm y} \sin \theta \sin \phi + \sigma_{\rm z} \cos \theta =$

$$= \chi_{(+)} \otimes \chi_{(+)}^{+} - \chi_{(-)} \otimes \chi_{(-)}^{+}, \qquad (1)$$

$$\chi_{(+)} = \begin{pmatrix} \cos \frac{\theta}{2} \\ \mathrm{e}^{\mathrm{i} \varphi} \sin \frac{\theta}{2} \end{pmatrix}, \quad \chi_{(-)} = \begin{pmatrix} -\sin \frac{\theta}{2} \\ \mathrm{e}^{\mathrm{i} \varphi} \cos \frac{\theta}{2} \end{pmatrix}, \qquad \left| \chi_{(\pm)} \right|^2 = 1, \quad \chi_{(-)}^+ \cdot \chi_{(+)} = 0.$$
 $\sigma_{\mathrm{r}} \chi_{(+)} = \chi_{(+)} \quad , \qquad \sigma_{\mathrm{r}} \chi_{(-)} = -\chi_{(-)}.$

Own Pauli vector

$$\sigma_{\rm z} \ = \ \uparrow \otimes \uparrow^+ - \downarrow \otimes \downarrow^+, \eqno(2a)$$

$$\sigma_{\rm x} = \uparrow \otimes \downarrow^+ + \downarrow \otimes \uparrow^+, \tag{2b}$$

$$\mathrm{i}\sigma_{\mathrm{y}} = \uparrow \otimes \downarrow^{+} - \downarrow \otimes \uparrow^{+},$$
 (2c)

$$E = \uparrow \otimes \uparrow^+ + \downarrow \otimes \downarrow^+ .$$
 (2d)

 $\sigma_x,~\sigma_y$ and σ_z become Hermitian and unitary automaticaly and satisfy to the commutation relations:

$$\sigma_z = \sigma_z^+, \quad \sigma_z^2 = \mathrm{E}, \quad \sigma_z \sigma_x = -\sigma_x \sigma_z = \mathrm{i} \sigma_y, \dots$$

Thanks You for attantion

:)