

ハイパー核

朝日、遠藤、小笠原、関、千阪

平成 15 年 7 月 5 日

1 動機

我々の知っている原子核といえば、陽子と中性子からできていた。陽子と中性子をご存知の通りアップクォークとダウンクォークからできている。

ここで興味をもったのはアップクォーク、ダウンクォークとは異なるストレンジクォークが入っている原子核についてである。この我々にとって未知の原子核はハイパー核といい、その性質をじかにこの眼で見れる装置があるという。その名もエマルジョン（写真乾板）。これにより、ハイパー核の飛跡がみれるらしい。

またハイペロンの結合エネルギーが通常の核子の結合エネルギーとどう違うのかを調べてみたいと、思い立った。

そこで興味を持って調べたい内容は以下ようになった。

1. ハイパー核をエマルジョンで見る。
2. 粒子の結合エネルギーを測定する。

2 ハイパー核とは

- ハイパー核 ハイペロンを含む核
- ハイペロン s (ストレンジクォーク) をひとつ以上含むバリオン

陽子や中性子はパウリの原理によりすでに占められているエネルギー状態に入ることはできないが、 Λ 粒子はストレンジネスという量子数をもっているので、原子核のどの状態にも入ることができる。

Λ 粒子は核内や自由粒子で強い相互作用に対しては安定だが、弱い相互作用で崩壊する。

例えば $\Lambda \rightarrow \pi^- p$ (寿命は 10^{-10} sec 程度)

Λ 粒子と核子の相互作用をみて、原子核の中を調べる探子として利用する。

3 具体的実験内容

3.1 実験装置

3.1.1 K2 ビームライン

高エネルギー研究所にある、KEK-PS の K2 ビームラインにより陽子を加速し、最終的に 12GeV のエネルギーをもった陽子を得る。

1. pre projection 750keV

2. protonLINAC 40MeV

750KeV に加速された H^- イオン (陽子 1 個と電子 2 個からなるイオン) をさらに 40MeV まで加速する。 H^- イオンはカーボンの薄膜を通過するとき、2 個の電子をはぎ取られて普通の陽子になる。

3. BoosterSynchrotron 500MeV

主リングの最終エネルギー到達時のビーム強度を上げるため、加速の中間段階を受け持つシンクロトロン。0.025 秒間に 500MeV に加速する。加速の繰り返し周波数は 20Hz で、4 秒ごとに 9 個のパルスの主リングに入射する。

4. MainSynchrotron 12GeV

ブースターの 9 倍 (108m) の平均直径をもつシンクロトロンであり、その 1 サイクル (4.1 秒) の間にブースターの 9 サイクル分の陽子を最高エネルギー 12GeV まで加速する。

1,2,3,4 の順に陽子を加速する。

K2 beam line を使うとすると

K^- の intensity は 10^5 個/sec

π の intensity は 1.5×10^7 個/sec

K^- が最も効率よく来るのは、1.66Gev の運動量をもっているとき。

K- π ratio は 1/4 1.66Gev の K^- が入射ビームとして 25%やってくる。

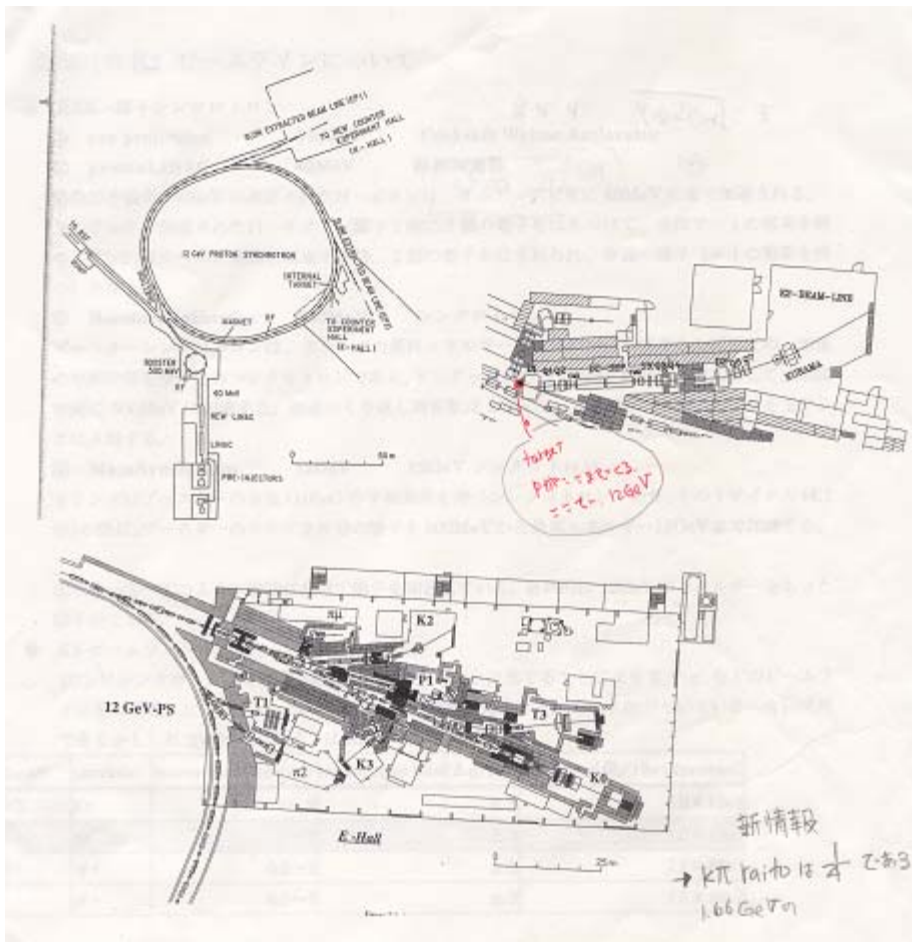
オンラインで分離すると、含まれる π を 0.20%ぐらいにできる。

3.1.2 エマルジョン

エマルジョンとは？

荷電粒子の通過によって、現像可能な臭化銀の結晶粒を形成させ、粒子飛跡を得る特別な写真乾板。飛跡の空間分解能が $0.3 \sim 0.1 \mu m$ きわめて高く、精密な測定に優れている。実際に顕微鏡をのぞいて、崩壊の様子を直接目で確認することができるので、われわれの「ハイパー核を見たい」という動機にかなった装置だといえる。

エマルジョンの組成



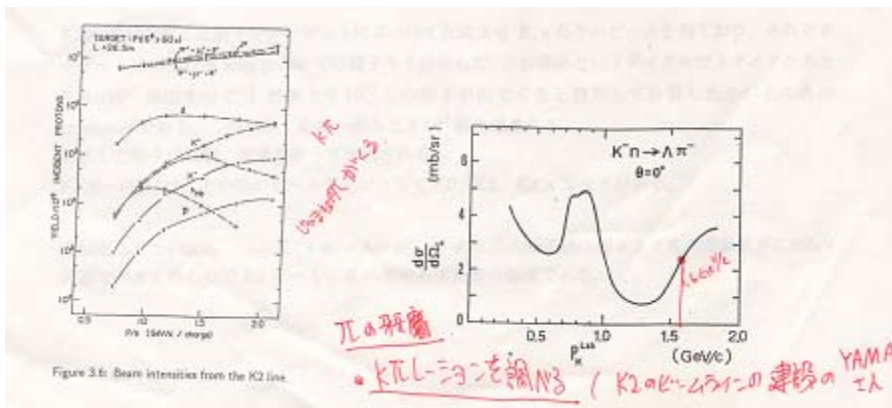
元素	質量数	質量 %	個数/cm ³	全散乱断面積 [cm ²]	反応数 [/cm・s]
I	127	0.3	5.30×10^{19}	1.16×10^{-24}	0.615
Ag	108	45.4	9.44×10^{21}	1.04×10^{-24}	98.176
Br	80	33.4	9.37×10^{21}	8.54×10^{-25}	80.020
S	32	0.2	1.40×10^{20}	4.64×10^{-25}	0.650
O	16	0.3	9.54×10^{21}	2.92×10^{-25}	27.857
N	14	0.3	4.97×10^{21}	2.67×10^{-25}	13.290
C	12	0.3	1.74×10^{22}	2.41×10^{-25}	41.934
H	1	0.3	3.37×10^{22}	4.60×10^{-26}	15.502

反応数は、K2 ビームラインにおいて毎秒 10^4 が来るとして、 $10^4 \times \text{個数/cm}^3 \times \text{全散乱断面積}$ を反応数とする。K⁻ がエマルジョンの中の原子と反応する個数は、毎秒約 264 個/cm である

3.2 解析方法

スペクトロメーター編

・結合エネルギーの算出 $1.66 \text{ GeV}/c$ の $K^- + n \rightarrow \Lambda + \pi^-$ の反応によって Λ 核を作り、 π^- のエネルギーからその結合エネルギーを調べる。標的 C に当たった粒子は $K^- + C \rightarrow C_\Lambda + \pi^-$



エマルジョン編

・確認可能なハイパー核の崩壊の数

エマルジョンの量を $24\text{cm} \times 24\text{cm} \times 1\text{cm}$ とした上で、どれくらいハイパー核の崩壊の様子が確認できるのかを調べてみる。実際の実験では、 $22\text{cm} \times 22\text{cm} \times 1\text{cm}$ の範囲にビームを当てる。

1. K2 ビームラインからは、毎秒 1.0×10^4 個の K^- がやってくる。ビームの断面は、 $0.41 \times 0.53\text{cm}^2$ である。実際のビームは 2 秒間でできて、2 秒間休むというサイクルを繰り返す。

2. K^- が 1cm の厚さのエマルジョンの中の原子と反応する個数は、毎秒約 264 個である。

3. 散乱した K^- のうち、約 1% がハイパー核になることが過去の実験によりわかっている。

4. Λ が π^- と p に崩壊する確率は約 63.9% である。(π^0 と n への崩壊は 35.8%)

5. 質量測定のためには、 Λ が崩壊してできる粒子がエマルジョンの中にとどまる必要がある。エマルジョンの体積を $24\text{cm} \times 24\text{cm} \times 1\text{cm}$ とする。一番質量の軽い π^- ($m_\pi = 140\text{MeV}$) の range がもっとも長いこと (約 2.5cm) から、これがエマルジョンの外に出ない確率は、立体角計算で考えて約 20%

6. ビームをエマルジョンに照射する時間は、一箇所当たり 20 秒とする。(40 秒ごとにエマルジョンを動かす。)

これは、単位面積あたりに 10^6 個程度の飛跡なら、解析可能とすると、

$$10^6 \div 10^4 / (0.41 \times 0.53) \approx 20\text{s}$$

から得られる。

7. ビームの照射回数は、トータルで

$$22 \times 22 / (0.41 \times 0.53) \approx 2227$$

より、2227 回。

1 から 7 までの考察から、このエマルジョンに残る識別可能な崩壊の数は、

$$264 \times 20 \times 2227 \times 0.01 \times 0.64 \times 0.2 \approx 15000$$

15000 個の崩壊の様子が残ることになる。しかし、ビームの全照射時間は、

$$40 \times 2227 = 89080(\text{sec})$$

となり、約 24.7 時間かかることになる。

エマルジョン解析の手順

- 1、エマルジョンを顕微鏡で見る。
- 2、ハイパー核によってできたと思われる飛跡の vertex を探す。
- 3、飛跡の色の濃さ、長さから粒子を粗く仮定する。
 濃い 速度遅い (質量大)
 薄い 速度速い (質量小)
 長い エネルギー大
 短い エネルギー小
- 4、それぞれの vertex で可能な粒子の崩壊モードを考える。
 Ag など重い核だと飛跡は見えないので、候補は C、N、O など。
 崩壊する前のハイパー核の運動量、エネルギーは 0 とする。
- 5、運動量が保存されない場合は、中性子の放出を仮定する。
- 6、仮定した粒子について、静止するまでの飛跡の長さ (range) を測定し、Bethe-Bloch の式

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln\left(\frac{2m_e \gamma^2}{I^2}\right) - 2\beta^2 - \delta \right]$$

より、崩壊直後の各粒子のエネルギーを求める。

- 7、たとえば、 $\Lambda C \rightarrow B + p + \pi^-$ という反応だと、

$$B_A = (M_\Lambda + M_C - M_B - M_p - M_\pi)c^2 - (E_B + E_p + E_\pi)$$

として結合エネルギーが求められる。

K^- ビームを標的核 (たとえば ^{208}Pb) に照射して核内で、 $K^- + n \rightarrow \Lambda + \pi^-$ の反応を起こして核を作り出でくる π^- のエネルギーから結合エネルギーを調べる。これによって p と n 以外のバリオンを含む自然界にない原子核を作り、それを確認することができる。

実験

運動量が $1.66 GeV/c$ の K^- ビームを標的核 A に照射して Λ 核 A' を作る。

$$K^- + A \rightarrow A' + \pi^- \quad (1)$$

エネルギーの保存により

$$E_K + E_A = E_{A'} + E_\pi \quad (2)$$

$$\vec{p}_K + \vec{p}_A = \vec{p}_{A'} + \vec{p}_\pi \quad (3)$$

ここで、E はエネルギー、 \vec{p} は運動量、m は質量であり、添え字で粒子を区別した。また、固定標的を用いて実験を行うので $\vec{p}_A = 0$ 、 $E_A = m_A c^2$ となる。原子核の結合エネルギーを B とし、添え字で核種を区別すると、

$$B_A = Z m_p c^2 + N m_n c^2 - m_A c^2 \quad (4)$$

$$B_{A'} = Z m_p c^2 + (N - 1) m_n c^2 + m_\Lambda c^2 - m_{A'} \quad (5)$$

(但し、Z, N はそれぞれ核 A の陽子数、中性子数) なので、上の保存則、及び $E = \sqrt{((m c^2))^2 + c^2 |(\vec{p})|^2}$ 用いると、

$$B_{A'} = B_A - \sqrt{((E_K + E_A - E_\pi))^2 - c^2(|\vec{p}_K + \vec{p}_A - \vec{p}_\pi|)^2 + m_A c^2 + m_\Lambda c^2 + m_{A'} c^2 - m_n c^2} \quad (6)$$

前方散乱の π^- の検出することによって、 (E_π, \vec{p}_π) がわかるので $B_{A'}$ が求まる。

誤差物理量の誤差は δ をつけて表す。上の $B_{A'}$ の標識より

$$\delta B_{A'} \approx - \frac{(E_K + E_A - E_\pi)(\delta E_K + \delta E_A - \delta E_\pi) - c^2(\vec{p}_K + \vec{p}_A - \vec{p}_\pi)(\delta \vec{p}_K + \delta \vec{p}_A - \delta \vec{p}_\pi)}{\sqrt{((E_K + E_A - E_\pi))^2 - c^2(|\vec{p}_K + \vec{p}_A - \vec{p}_\pi|)^2}} \quad (7)$$

但し、既知の量 $B_{A'}$ 、 m_A 、 m_Λ 、 m_n は十分精密にわかっているものとした。

$\vec{p}_A = \vec{0}$ 、 $E_A = m_A c^2$ であり、 $\delta \vec{p}_A$ 、 δE_A は熱的ゆらぎによるものなので十分小さいとして、落とすと

$$\delta B_{A'} \approx - \frac{(E_K + E_A - E_\pi)(\delta E_K - \delta E_\pi) - c^2(\vec{p}_K - \vec{p}_\pi)(\delta \vec{p}_K - \delta \vec{p}_\pi)}{\sqrt{((E_K + E_A - E_\pi))^2 - c^2(|\vec{p}_K - \vec{p}_\pi|)^2}} \quad (8)$$

従って、二乗平均を取ると、

$$\begin{aligned} \overline{(\delta B_{A'})^2} &\leq (E_K + E_A + E_\pi)^2 (\overline{\delta E_K^2} + \overline{\delta E_\pi^2}) + c^4 |\vec{p}_K - \vec{p}_\pi|^2 (\overline{|\delta \vec{p}_K|^2} + \overline{|\delta \vec{p}_\pi|^2}) \\ &+ 2c^2 (E_K + E_A - E_\pi) |\vec{p}_K - \vec{p}_\pi| (\overline{|\delta \vec{p}_K|^2} + \overline{|\delta \vec{p}_\pi|^2}) \times \frac{1}{((E_K + E_A - E_\pi))^2 - c^2(|\vec{p}_K - \vec{p}_\pi|)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

E_π と \vec{p}_π は別個に測定するが、 E_K は \vec{p}_K を測定して $E_K = \sqrt{(m c^2)^2 + c^2 |\vec{p}_K|^2}$ から

$$\delta E_K \simeq \frac{c^2 \vec{p}_\pi \cdot \delta \vec{p}_K}{E_K} \leq \frac{c^2 |\vec{p}_K|}{E_K} |\delta \vec{p}_K| \quad (10)$$

と求めるので E_K と \vec{p}_K は独立ではない。又、運動量の向きは精密に測定しないので $\vec{p} \cdot \delta \vec{p}$ は $|\vec{p}| |\delta \vec{p}|$ に置き換えた。

$A = {}^{208}\text{Pb}$ の場合に $\delta B_{A'}$ の値を見積もる。 $m_K c^2 \simeq 490 \text{MeV}$ 、 $m_\pi c^2 \simeq 140 \text{MeV}$ 、 $E_A = m_A c^2 \simeq 193.7 \text{GeV}$ 、 $c |\vec{p}_K| \simeq 1.66 \text{GeV}$ なので A' の反跳を無視すると $E_K \simeq 1.730 \text{GeV}$ 、 $c |\vec{p}_\pi| \simeq 1.66 \text{GeV}$ 、 $E_\pi \simeq 1.666 \text{GeV}$ と算出される。又、実験を行う K2 ビームラインでは $c |\delta \vec{p}_K| \simeq 0.059 \text{GeV}$ 、 $c |\delta \vec{p}_\pi| \simeq 40 \text{keV}$ 、 $|\delta E_\pi| \simeq 8.7 \text{MeV}$ なので $|\delta E_K| \simeq 0.057 \text{GeV}$ であり、 $|\delta \vec{p}_\pi| \ll |\delta \vec{p}_K|$ として $|\delta \vec{p}_\pi|$ を落とすと $\delta B_{A'} \simeq 58 \text{MeV}$

原子核の平均場ポテンシャルの深さが核子数に比例すると近似すると、 A が ${}^{12}\text{C}$ のときは $B_{A'} \simeq 11 \text{MeV}$ なので A が ${}^{208}\text{Pb}$ のとき

$$B_{A'} \sim \frac{208}{12} * 11 \text{MeV} \simeq 190 \text{MeV} \quad (11)$$

従って上の精度でこれを見積もることができる。