

‘An Investigation of The Spin Structure of The Proton in Deep Inelastic Scattering of Polarised Muons on Polarised Proton’

偏極ミュオンと偏極陽子の深非弾性散乱実験による陽子のスピン構造の研究

J. Ashman et al.

The European Muon Collaboration

Nuclear Physics B328 (1989) 1-35

【内容】

1. 背景
2. 原理
3. 実験
4. 結果
5. まとめ

物理学科 柴田研究室

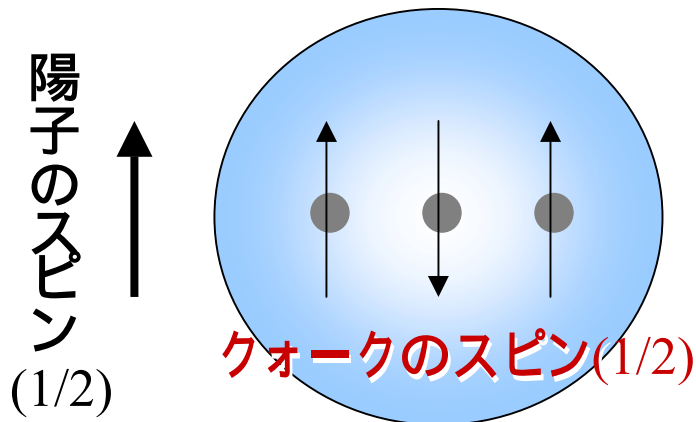
99-0508-5 岡浩喜

# 1. 背景

60年代以降の実験により、核子は点状の荷電粒子からなる内部構造を持っていること、その点状の構成要素(パートンの)のスピンの $1/2$ であることがわかっていった。

電荷を持つパートンはクォークである。  
陽子は3つのクォーク(2つのuクォークと1つのdクォーク)で構成される。

陽子のスピン $1/2$ を担うのは構成子であるクォークか？

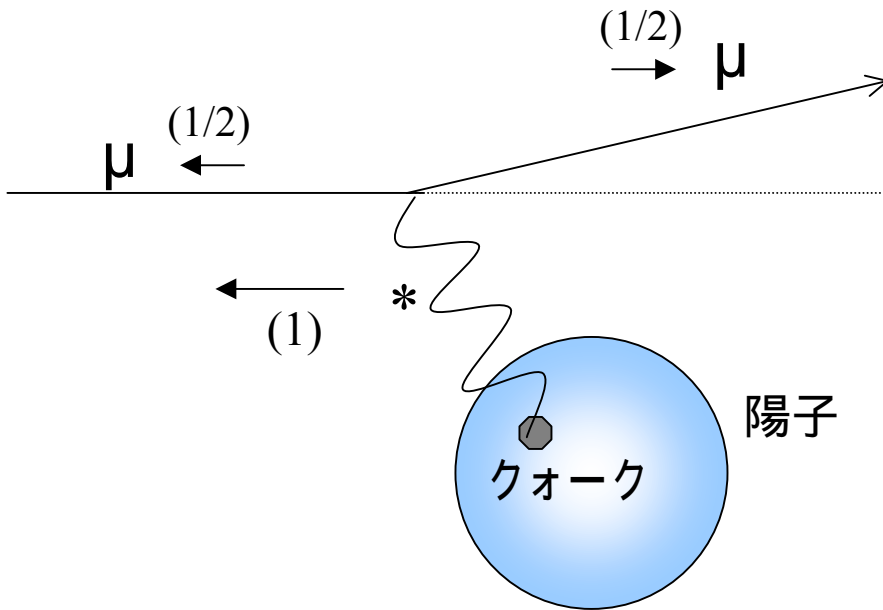


$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \quad ?$$

## 2. 原理

### 深非弾性散乱

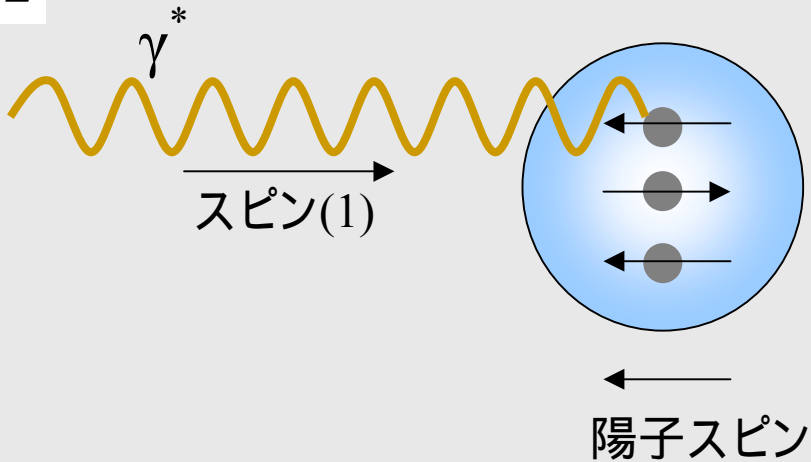
ミューオンと陽子を構成するクォークとの(弾性)散乱



電磁相互作用による散乱であって、ミューオンは仮想光子( $\gamma^*$ )を交換して散乱する。

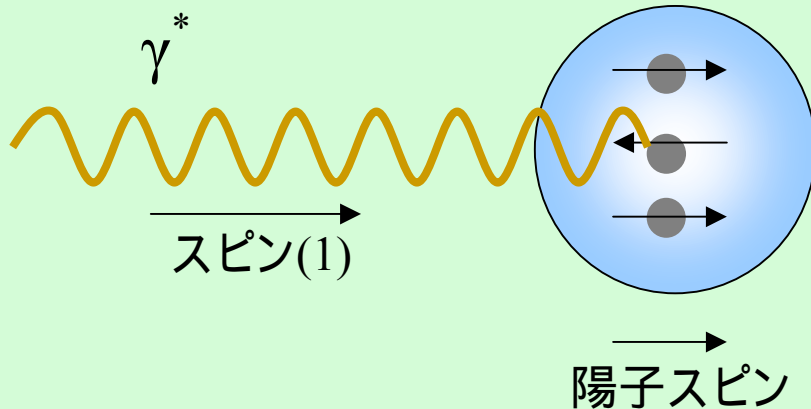
陽子側で光子を吸収するのは電荷を持つ構成子であるクォークである。

ミューオンが偏極していればそこから出る仮想光子も偏極する。(角運動量の保存)

$\sigma_{1/2}$ 

仮想光子を吸収できるのは仮想光子のスピンと反平行なスピンを持つクォークである。

陽子のスピンとクォークのスピンに関係があるならば、散乱断面積に差が出る。

 $\sigma_{3/2}$ 

本実験では非対称度

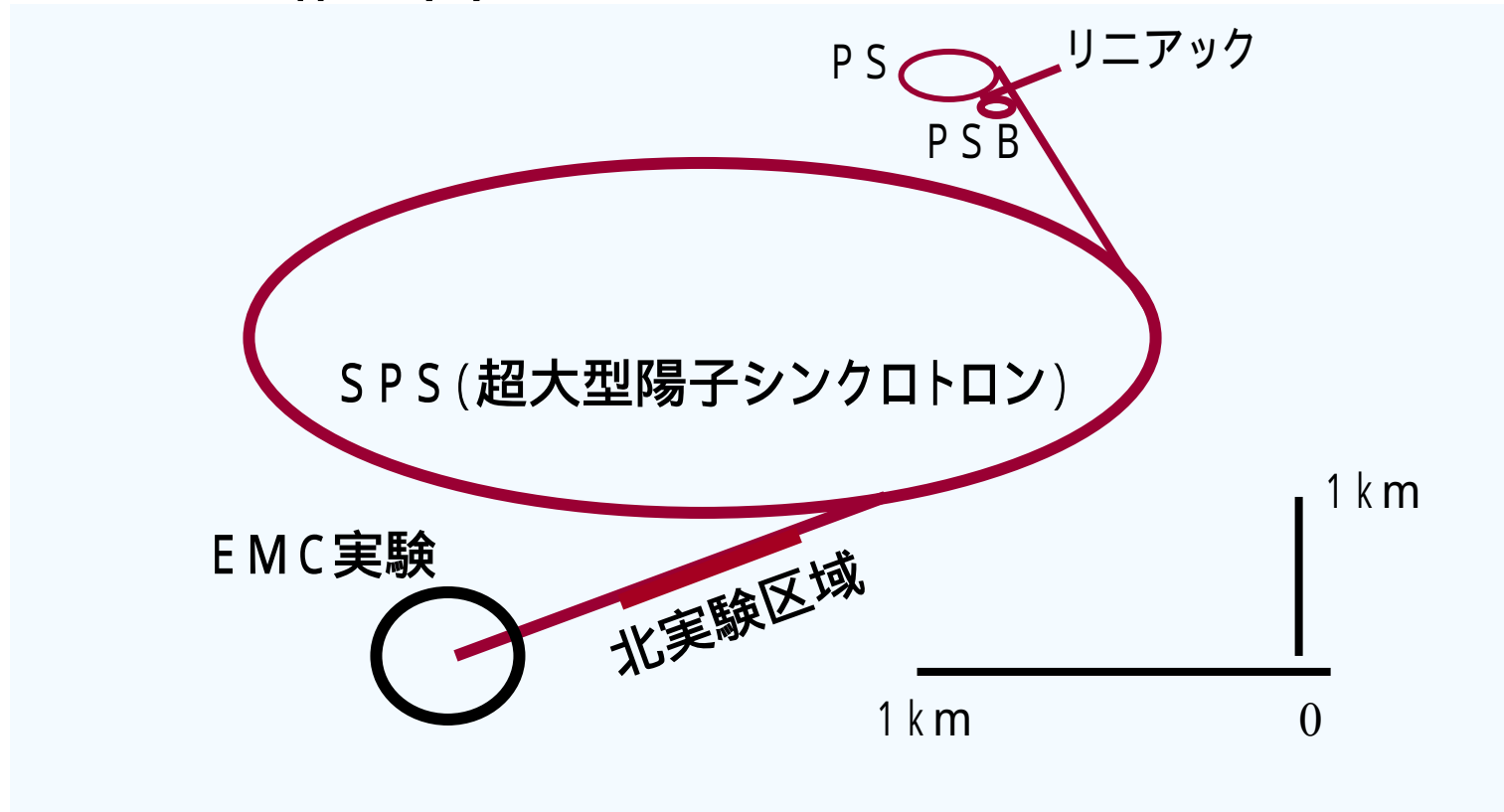
$$A_1 = \frac{\sigma_{1/2} - \sigma_{3/2}}{\sigma_{1/2} + \sigma_{3/2}} = \frac{N_{1/2} - N_{3/2}}{N_{1/2} + N_{3/2}}$$

を利用する。

### 3. 実験

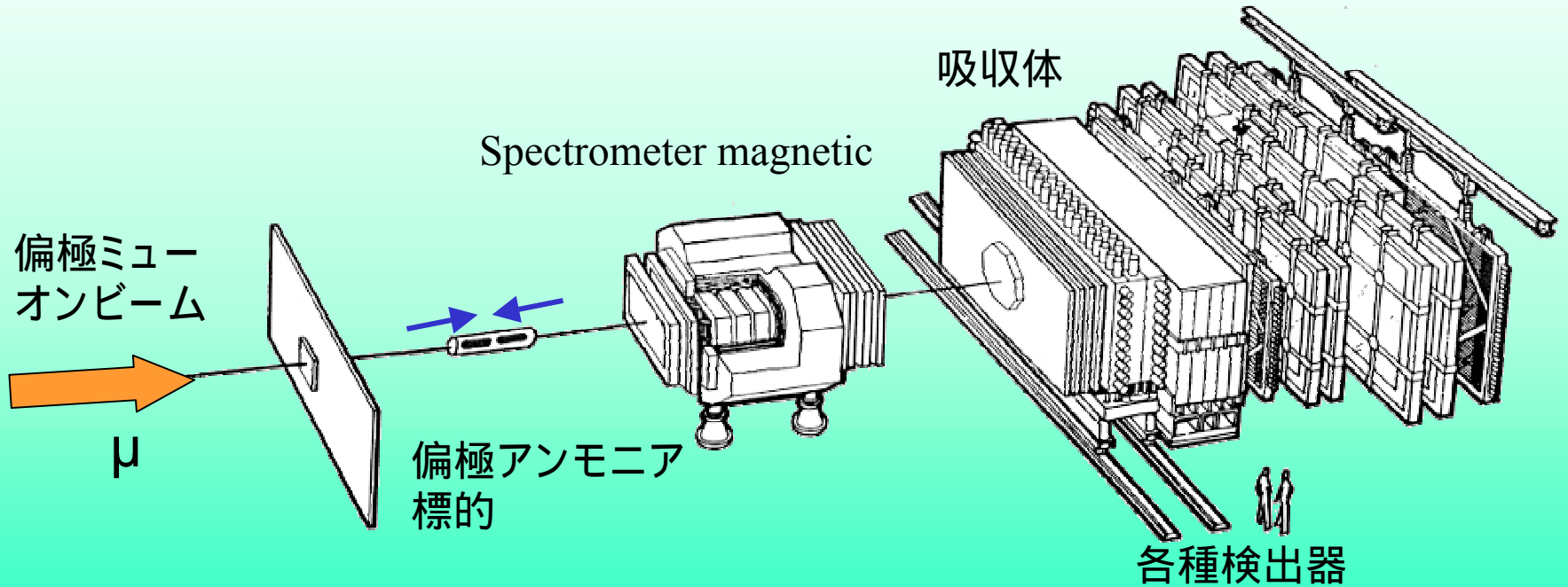
偏極ミュオンビームと偏極陽子ターゲットの深非弾性散乱  
CERN SPSの陽子ビームによってパイオンを作り、その崩壊から得られるミュオンをビームとして用いる。

CERN SPS配置図



ミュオンビームのエネルギーは  $E_{\mu} = 100, 120, 200 \text{ GeV}$  である。

# 実験の検出器



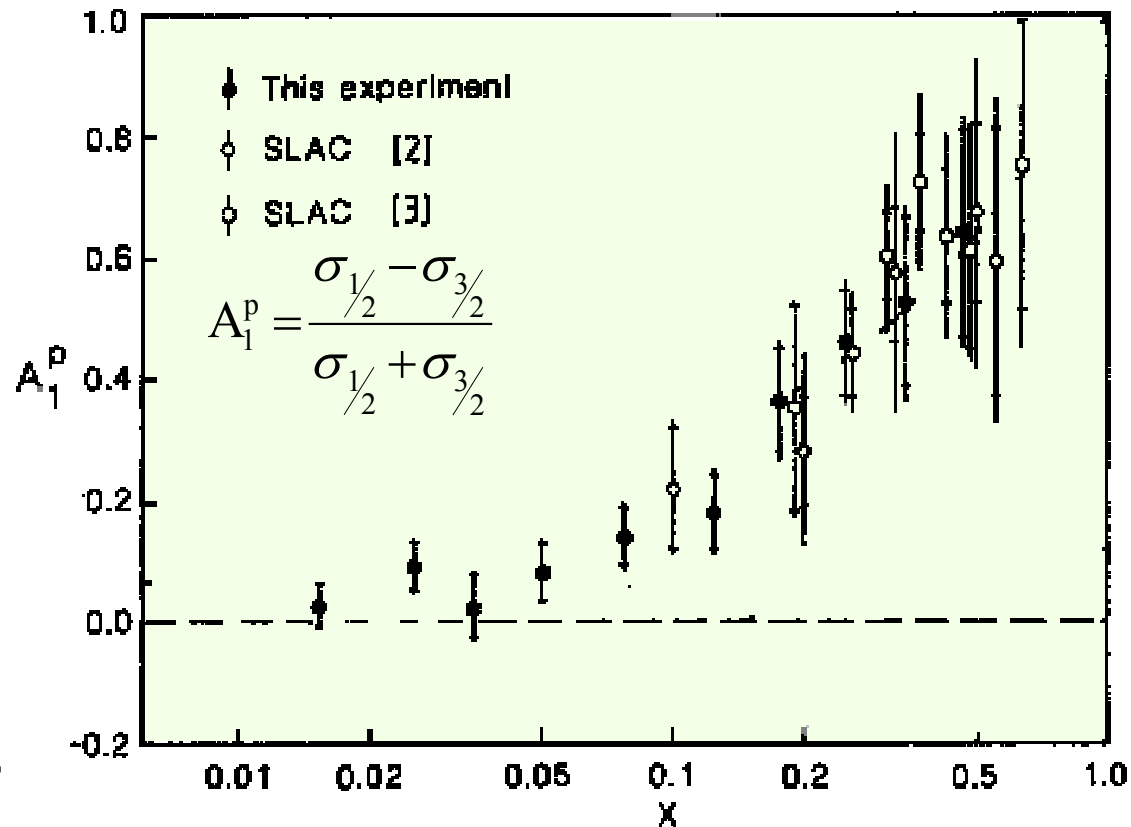
- 偏極アンモニア標的のセルは二つ。
- 偏極は逆向きなので、同一のビームで非対称度を出せる。

# 4. 結果

実験から得られた非対称度は全体として**正の値**を示している。

$$\sigma_{1/2} \geq \sigma_{3/2}$$

すなわち、陽子と平行のスピンの持つクォークのほうが多い。



x: ブジョルケンの x  
(陽子の全運動量に対するクォークの運動量の割合)

これより、クォークスピンの和は陽子スピンに対して正の寄与をしているとわかる。

しかし、この結果からクォークスピンの和を求めると、

$$\langle s_z \rangle_{\text{quarks}} = +0.060 \pm 0.047 \pm 0.069 < 0.5 \text{ となる。}$$

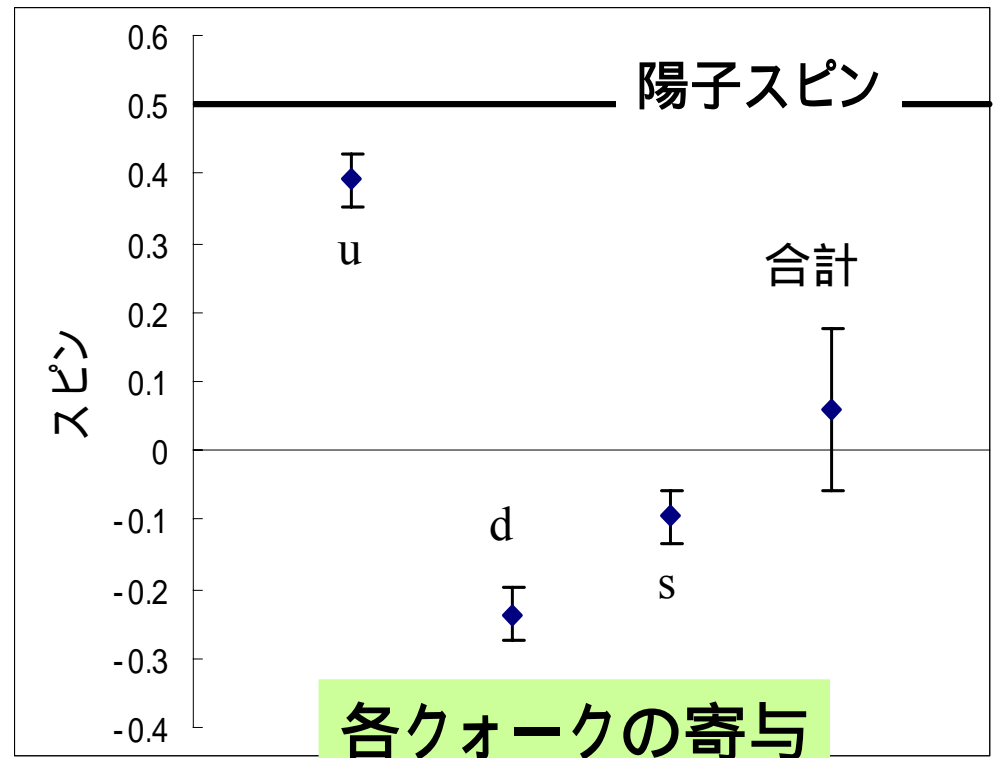
したがって、陽子のスピン1/2に対するクォークスピンの寄与は  $(12 \pm 9 \pm 14) \%$  である。

各クォークのスピンの和  
(誤差は  $\pm 0.016 \pm 0.023$ )

$$\langle s_z \rangle_u = 0.391$$

$$\langle s_z \rangle_d = -0.236$$

$$\langle s_z \rangle_s = -0.095$$





## 5. まとめ

- ・ CERNで偏極ミュオンビームと偏極陽子標的を用いた深非弾性散乱の実験がEMCによって行われた。
- ・ その結果、クォークのスピンは陽子のスピンに対し正の寄与をしていることが確認された。
- ・ しかし、陽子スピンに対するクォークスピンの寄与はわずかであることがわかった。

核子スピン = クォークスピンの和 (寄与はわずか)  
+ グルーオンスピンの和  
+ クォーク軌道角運動量  
+ グルーオン軌道角運動量

現在も、クォークのスピンの寄与を求める実験やグルーオンスピンの寄与を求める実験がCERN, SLAC, DESY, BNL, JLabなど世界の主要な研究所でで行われている。

# 解析の手法

$$A_1 = \frac{\sigma_{1/2} - \sigma_{3/2}}{\sigma_{1/2} + \sigma_{3/2}} \quad \text{の実験値から} \quad g_1 \approx A_1 \frac{F_2}{x} \quad \text{をもとめる。} \quad x = \frac{Q^2}{2M\nu}$$

$x$ が0 ~ 1の範囲で積分すると、

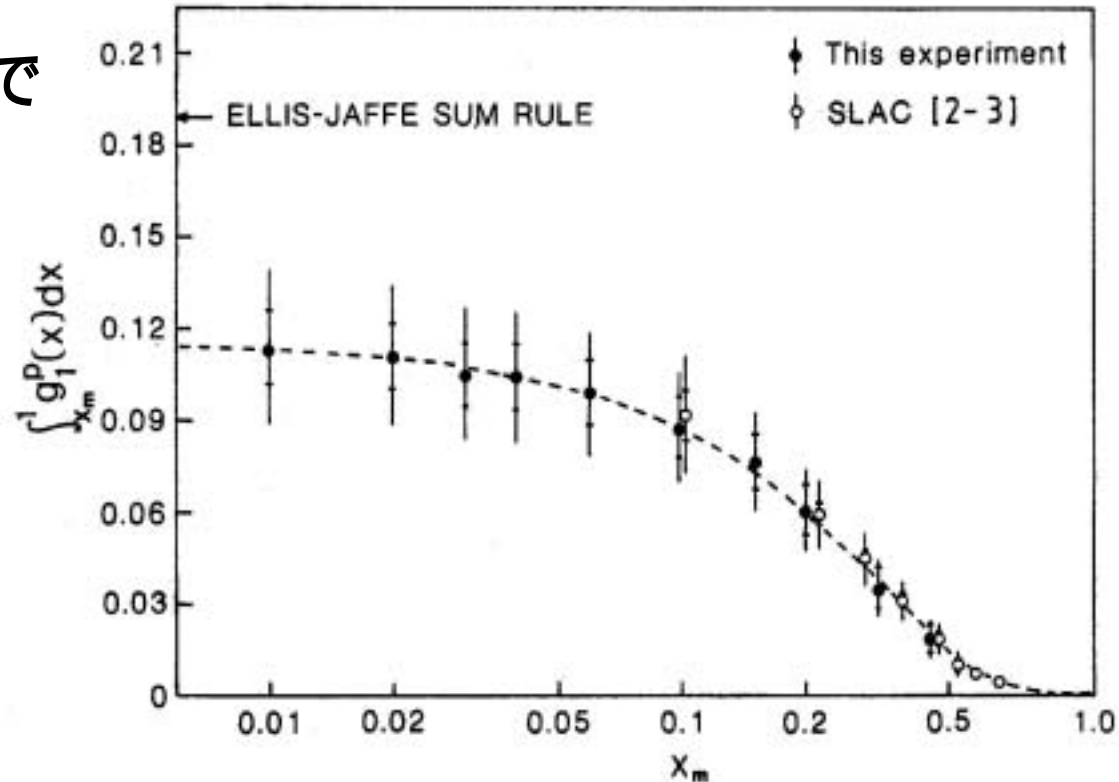
$$\int_0^1 g_1^p dx = \frac{1}{12} \left\{ \left[ 1 - \frac{\alpha_s}{\pi} \right] \left[ a_3 + \frac{1}{\sqrt{3}} a_8 \right] + 2\sqrt{\frac{2}{3}} \left[ 1 - \frac{33-8f}{33-2f} \frac{\alpha_s}{\pi} \right] a_0 \right\}$$

$a_3, a_8$  は既知の値であるので

$$a_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} (\Delta u + \Delta d + \Delta s)$$

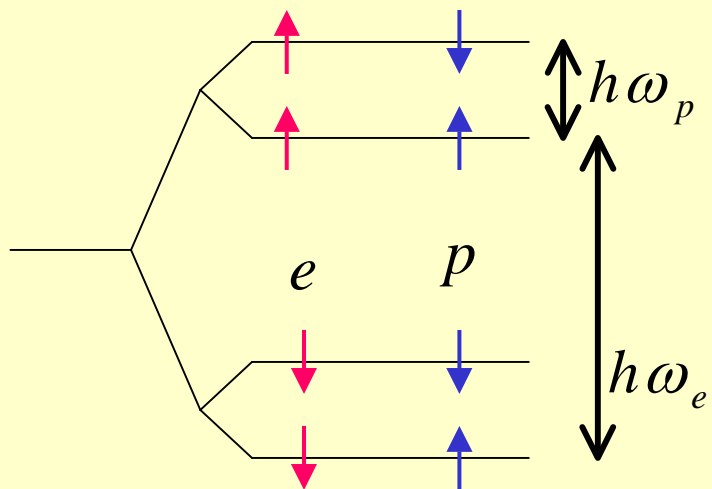
が求まる。

$$\langle s_z \rangle_{\text{quarks}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{2}} a_0$$




# 標的の偏極・DNP ( dynamic nuclear polarisation )

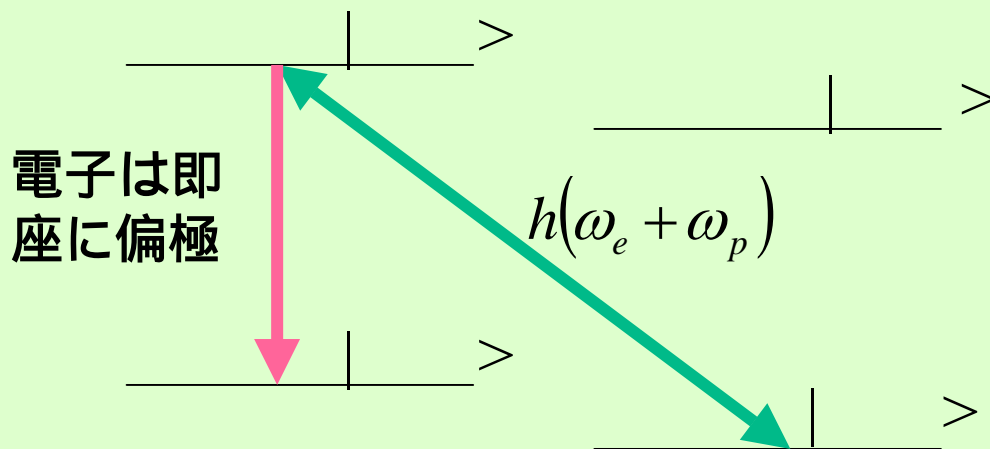
磁場をかけるとスピンによるエネルギー状態は二つに分かれる。  
電子と陽子のペアを考えると4つのエネルギー状態に分かれる。



電子は即座に偏極するが陽子は磁気モーメントが小さいためほとんど偏極しない。

$h(\omega_e + \omega_p)$  のマイクロ波を照射すると  $| \uparrow \downarrow \rangle$  と  $| \downarrow \uparrow \rangle$  が共鳴する。

 陽子のスピンの向きが下向きにそろおう



# ターゲットにアンモニアを使う理由

手に入る物質の中で最も多く水素を含んでいた。

本実験では自由陽子による散乱か束縛された核子による散乱かは判別できない。

標的の偏極はdilution factor  $f = \frac{\text{自由陽子}}{\text{全核子}}$  によって修正する

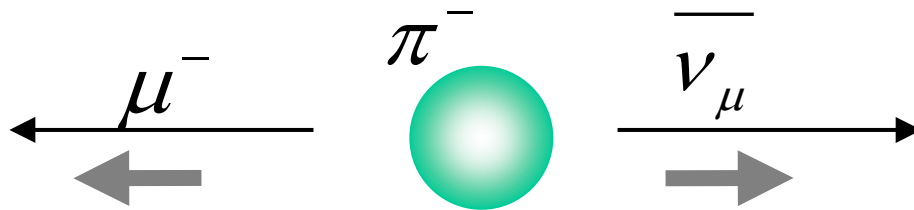
なるべく大きな  $f$  になる分子がよかった。

アンモニアの場合は  $f = \frac{3}{17}$  である。

# ミューオンの偏極

パイオンは  $\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}$  と崩壊する。

この際2体崩壊なので2粒子は反対方向に放出される。また、パイオンのスピンは0なので、2つのレプトンのスピンは互いに反対方向を向いている。ここで、ニュートリノのヘリシティは決まっているのでこのこの場合はヘリシティ-1/2の崩壊のみが許される。



これにより、パイオンのエネルギーと得られるミューオンのエネルギーをうまく選んでやると、縦偏極したミューオンビームが取り出せる。