

Spinowa Struktura Nukleonu

Marcin Stolarski

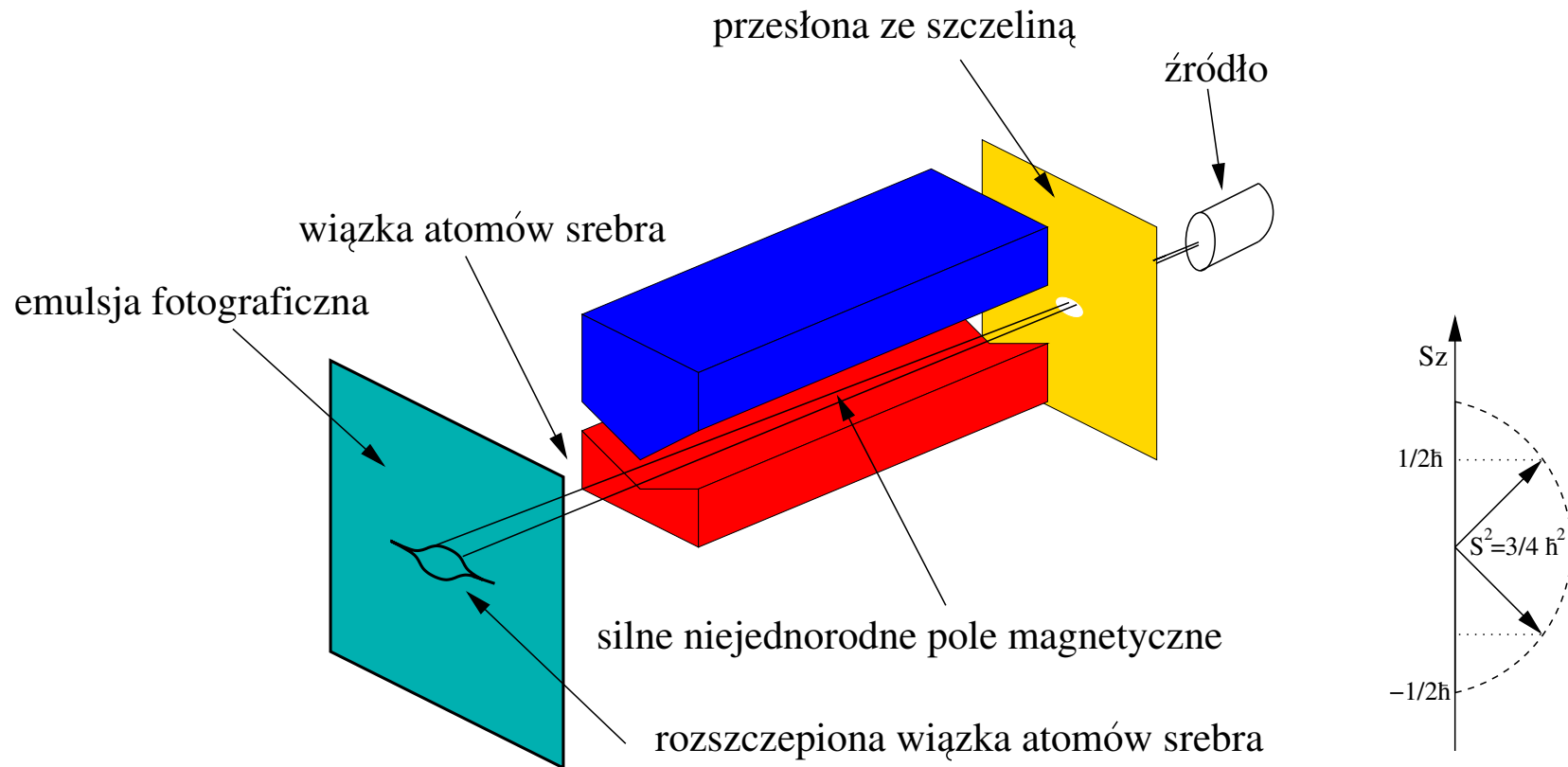
CERN

- nukleon i jego spin
- doświadczenie COMPASS

Jednostki i skale mikroświata

- jednostki energii i odległości
 - Giga elektronowolt $1\text{GeV} \approx 1.6 \cdot 10^{-13} J$
 - femtometr $1\text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$
 - zwykle używamy $\frac{h}{2\pi} = c = 1 \rightarrow E^2 = m^2 + p^2$
- skale mikroświata
 - rozmiar protonu: 1 fm
 - rozmiar elektronu, kwarku: $< 0.001\text{ fm}$ (być może punktowy)
 - masa protonu: 1 GeV
 - masa elektronu: 0.5 MeV
 - masa mionu (cięższy elektron): 0.1 GeV
 - energie w atomach: $\sim \text{eV-keV}$

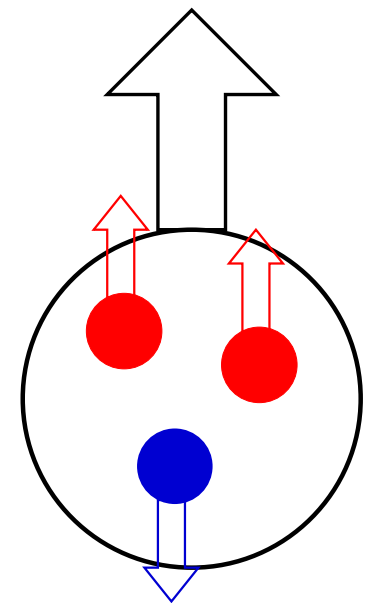
DOŚWIADCZENIE STERNA-GERLACHA (1922)



- klasycznie: rozszczenie wiązki ciągłe
- kwantowo: rozszczenie na $2L+1$ poziomów; $L=0, 1, 2, \dots$
- Uhlenbeck, Goudsmit (1925) koncept spinu jako kwantowego stopnia swobody cząstki

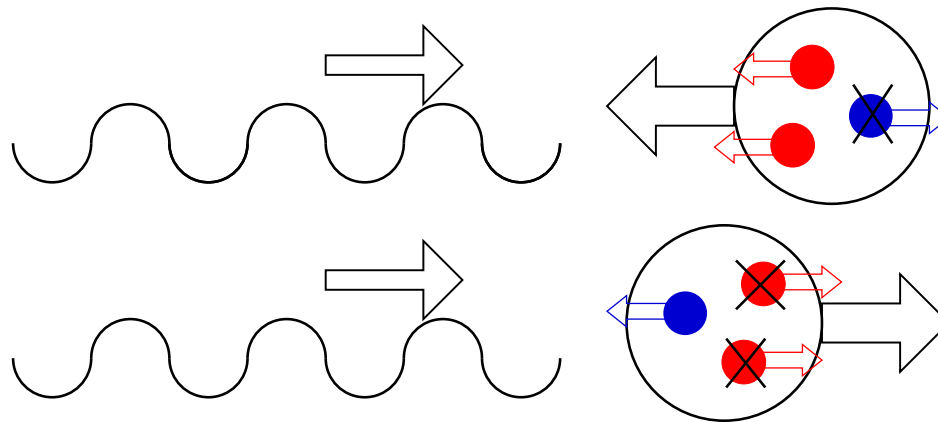
Nukleon i jego Spin

- spin: własny moment pędu cząstki, mierzony w jej układzie spoczynkowym. Jest skwantowaną cechą obiektów mikroświata.
- nukleon: fermion o spinie $1/2$ zbudowany z kwarków
- kwarki: fermiony o spinie $1/2$ i ułamkowym ładunku elektrycznym
- model kwarkowo-partonowy: najprostszy model opisujący strukturę wewnętrzną hadronów
 - nukleon zbudowany z trzech kwarków
 - model opisuje: masy, ładunki, momenty magnetyczne **spin(?)** nukleonu



Spin Nukleonu cd.

- Czy jedynie kwarki niosą spin protonu?
- **Spin: idea pomiaru** – oddziaływanie spolaryzowanych wirtualnych fotonów ze spolaryzowanym nukleonem



- Różne doświadczenia, energie, cząstki itp. trzeba ustalić zmienne kinematyczne, aby poprawnie interpretować wyniki z różnych eksperymentów.

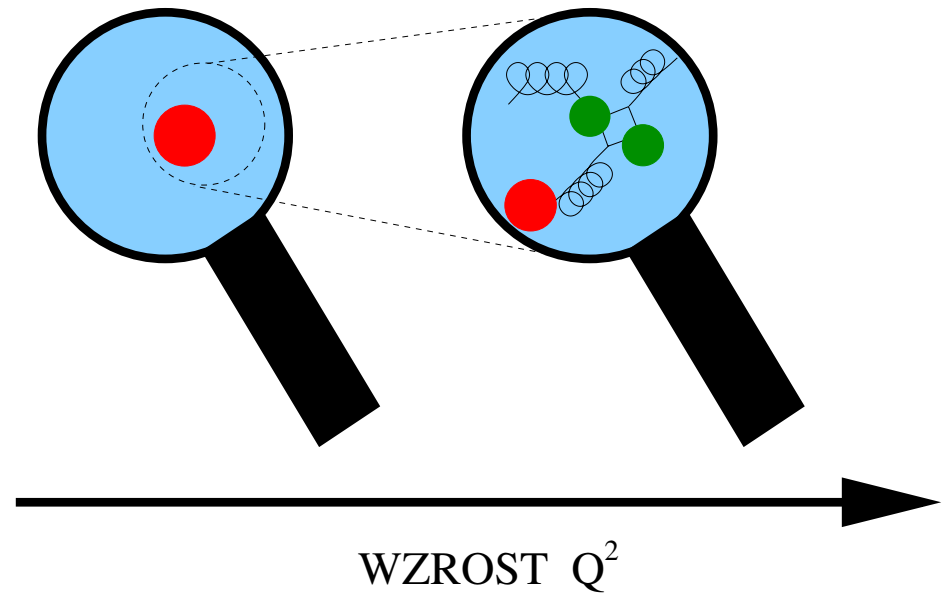
Zmienne Kinematyczne

x :

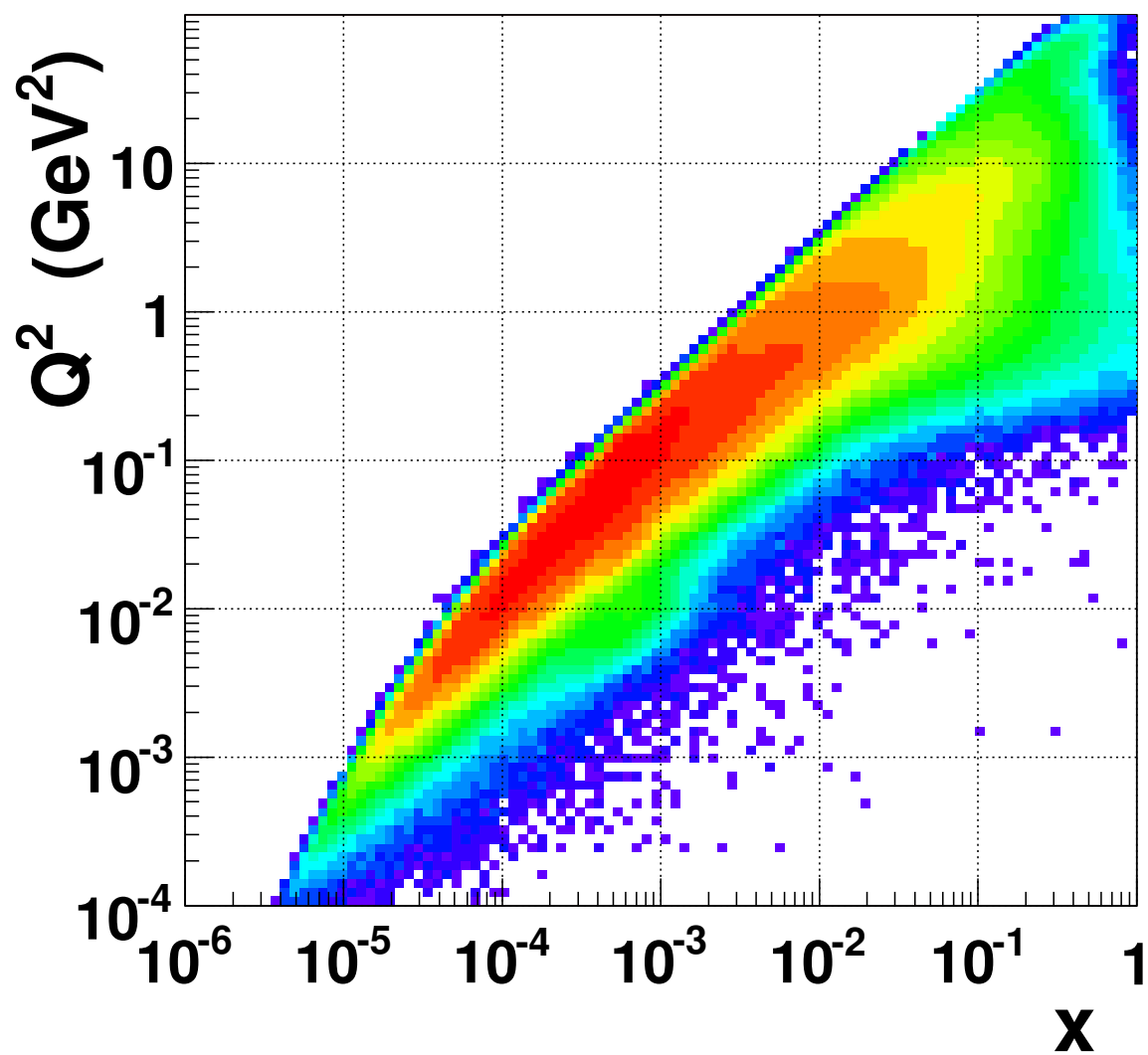
- w układzie nieskończonego pędu nukleonu,
 x jest ułamkiem pędu nukleonu niesionym przez parton (kwark)
- $x \in (0, 1)$
- małe x - bardzo dużo partonów

Q^2 :

- przekaz czteropędu w układzie lepton-nukleon
- $Q^2 = -m_{\gamma^*}^2$; $Q^2 \in (0, \infty) \text{ GeV}^2$
- Q^2 jest zdolnością rozdzielczą fotonu oddziałującego z nukleonem
- $Q^2 \approx 1 \text{ GeV}^2 \rightarrow \delta r \approx 10^{-15} \text{ m}$
- $Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$ obszar nieperturbacyjny

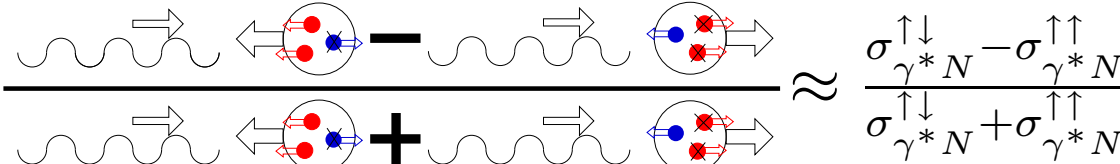


Obszar Kinematyczny

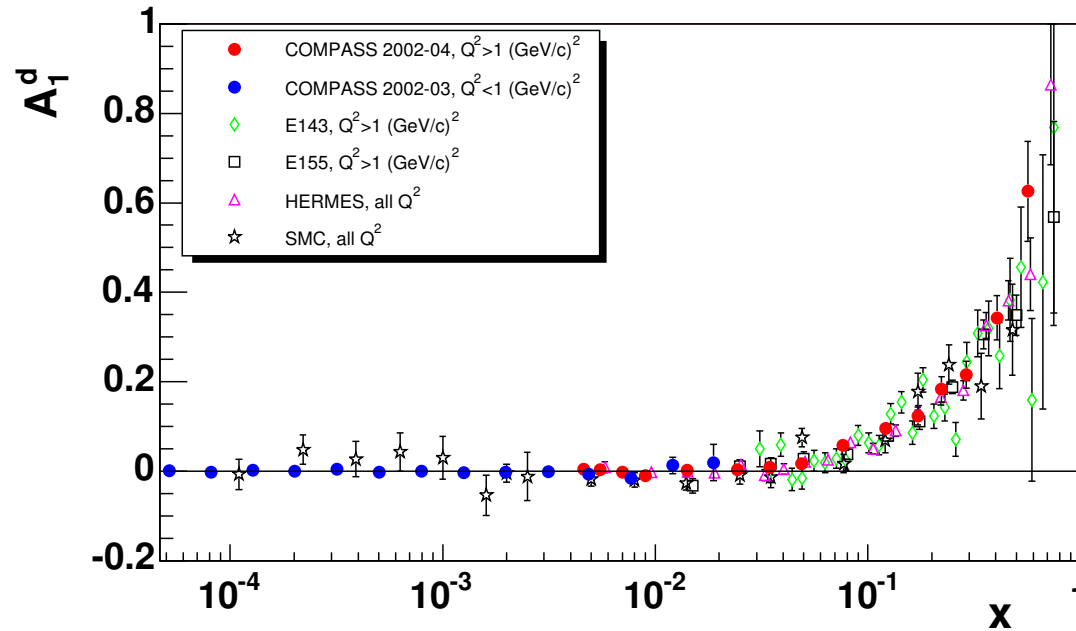


Kryzys Spinowy

asymetria $A_1 \approx$



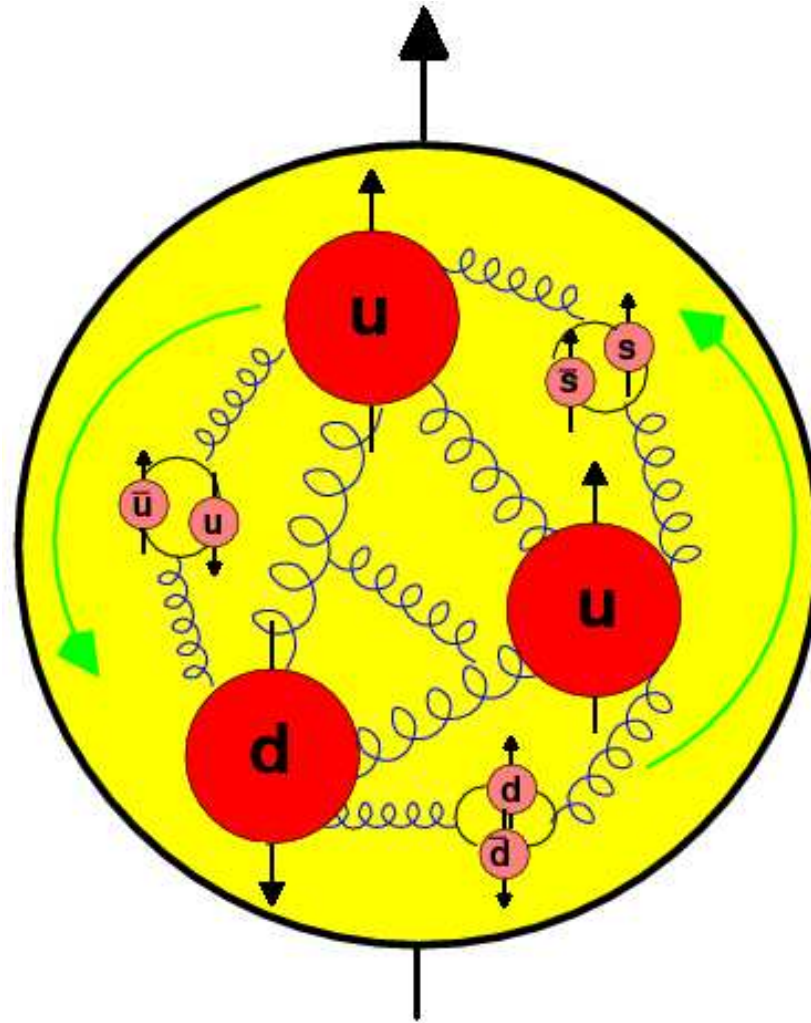
$$\approx \frac{\sigma_{\gamma^* N}^{\uparrow\downarrow} - \sigma_{\gamma^* N}^{\uparrow\uparrow}}{\sigma_{\gamma^* N}^{\uparrow\downarrow} + \sigma_{\gamma^* N}^{\uparrow\uparrow}}$$



- pozytywna asymetria dla dużych x , jak oczekujemy
- ALE, dokładne rachunki pokazują że:
kwarki niosą jedynie 30% spinu nukleonu

Kryzys Spinowy cd.

W bardziej skomplikowanych modelach, poza kwarkami walencyjnymi są także kwarki morza i gluony.



Kryzys Spinowy cd.

$$\text{spin nukleonu} = \frac{1}{2} = \Delta\Sigma + \Delta G + L_q + L_G$$

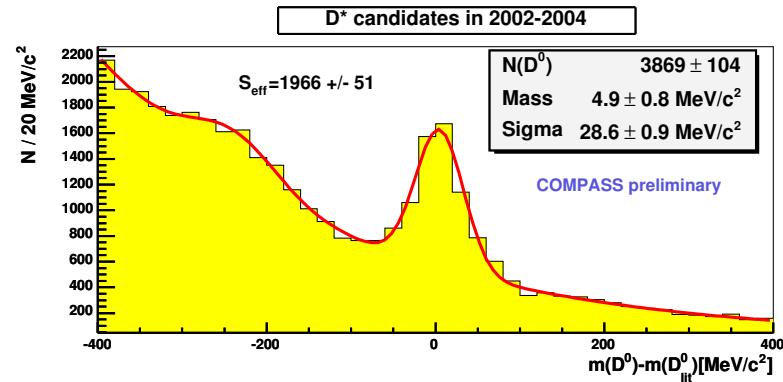
spin kwarków ($\Delta\Sigma$), gluonów (ΔG), orbitane momenty kwarków i gluonów (L_q , L_G)

Pomiar ΔG

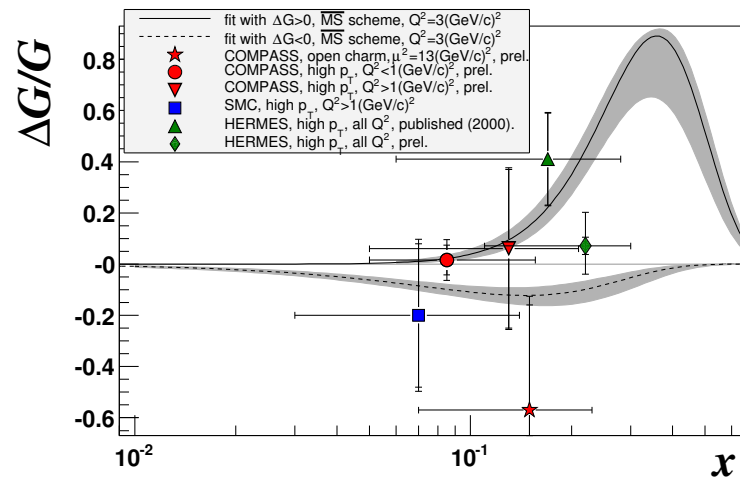
- wybrać proces w którym oddziałują gluony tzw. fuzja fotonowo-gluonowa,
 - produkcja mezonów powabnych (charm)
 - produkcja hadronów o dużym pędzie poprzecznym
- pomiar asymetrii (jak poprzednio, tylko dla specjalnych kanałów)

Pomiar ΔG jest głównym celem doświadczenia COMPASS

Pomiar ΔG wyniki.



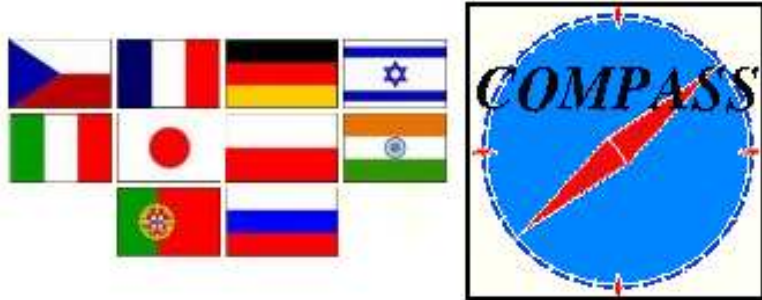
Masa niezmiennicza układu kaon-pion. Widoczny pik, pochodzi od mezonu powabnego D^0 . Zliczamy przypadki D^0 dla różnych wzajemnych ustawień spinu tarczy i wiązki, z pomiaru różnicowego obliczamy ΔG .



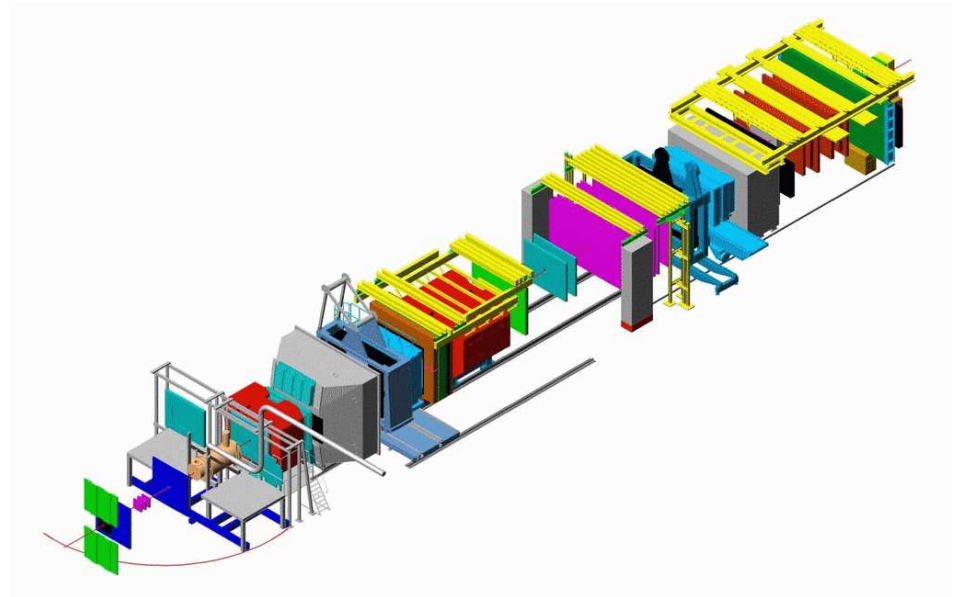
Wykonanie Doświadczenia

- oczywistości:
 - pieniądze (30M CHF)
 - infrastruktura (CERN)
 - ludzie (kilkaset osób)
- fizyka:
 - źródło spolaryzowanych fotonów → wiązka mionowa
 - spolaryzowana tarcza
 - rekonstrukcja torów (kierunek) cząstek → detektory
 - rekonstrukcja pędu i ładunku cząstek → magnes + detektory
 - identyfikacja cząstek
 - * mion - hadron → filtry mionowe
 - * hadron - elektron → kalorymetr elektromagnetyczny
 - * typ hadronu (pion, kaon, proton) → detektor RICH (Ring Imaging CHerenkov)

COMPASS @ CERN



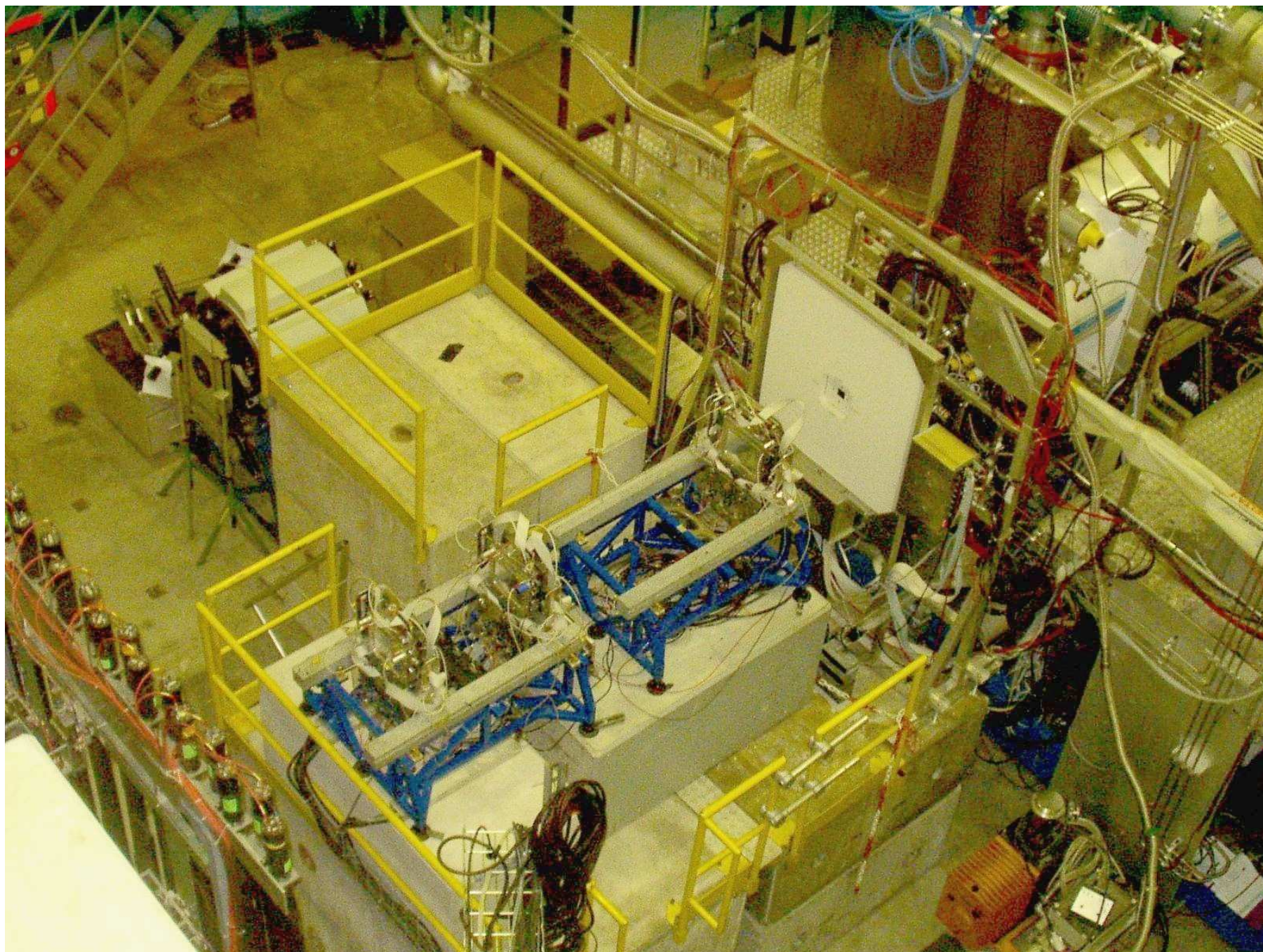
- WSPÓŁPRACA
 - około 240 fizyków
 - 31 instytutów
- DETEKTOR
 - długość 60 m
 - 2 magnesy
 - około 350 płaszczyzn detektorów
- SPOLARYZOWANA TARCZA
 - tarcza z ${}^6\text{LiD}$
 - $\pm 50\%$ polaryzacji
 - 40% polaryzowalnego materiału



- SPOLARYZOWANA WIĄZKA
 - miony o pędzie 160 GeV
 - polaryzacja -76%
- WŁASNOŚCI
 - akceptacja: 70 mrad
 - pomiar pędu i ładunku cząstek
 - rekonstrukcja toru: $p > 0.5$ GeV
 - identyfikacja: π , K , p (RICH) powyżej (odpowiednio) 2, 9, 18 GeV

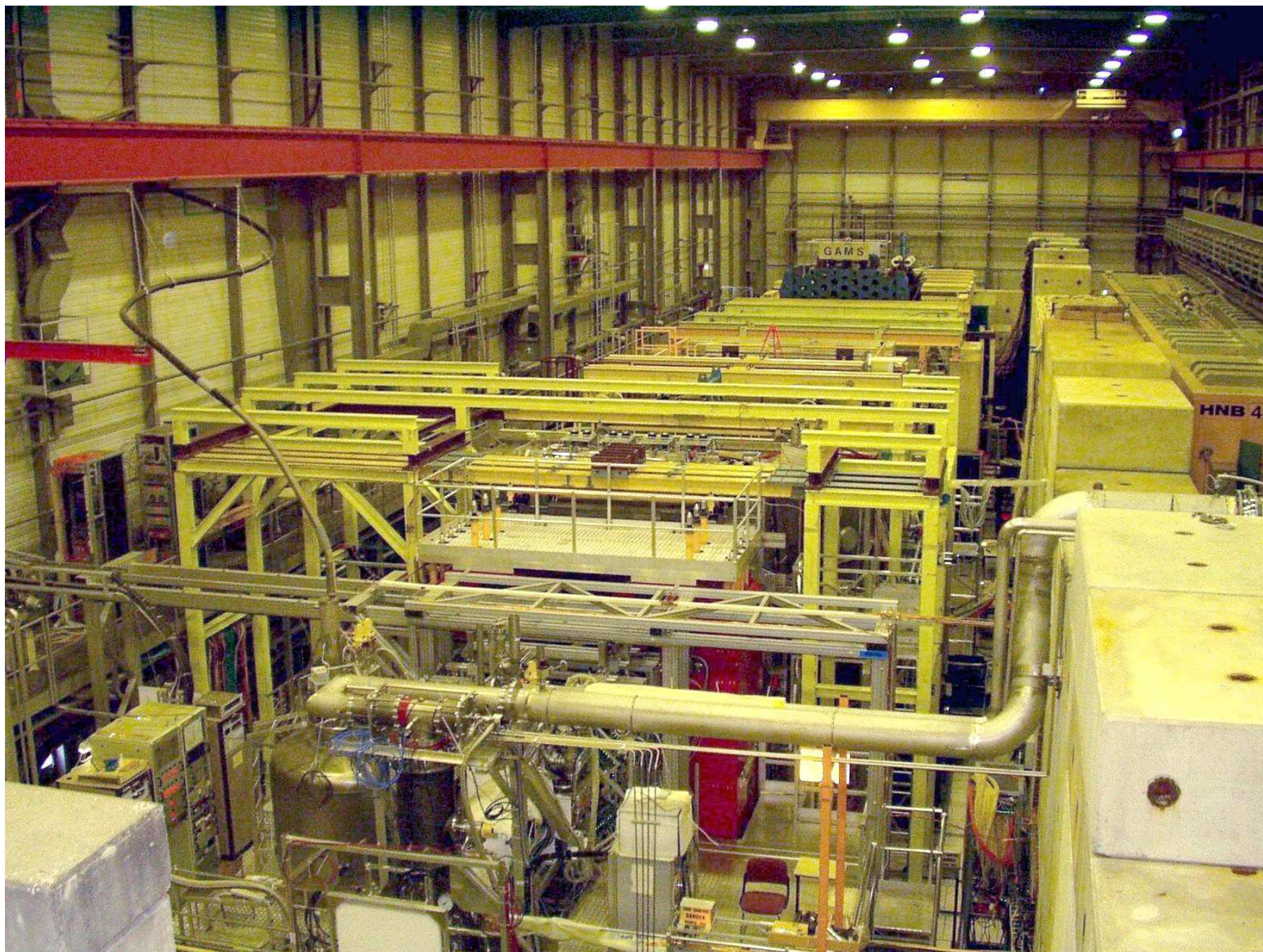
COMPASS @ CERN trochę detali...

- **Wiązka:** W akceleratorze SPS **protony**, przyspieszane do energii 450 GeV, uderzają w tarczę z berylu. W wyniku oddziaływania powstają min. **piony**, które następnie rozpadają się na **miony**. Ze względu na niezachowanie CP w oddziaływaniach słabych powstałe miony są spolaryzowane. Mionów używamy jako źródła fotonów wirtualnych.
 - energia 160 GeV, tylko dodatnie miony
 - intensywność $2 \cdot 10^{-8}$ /5 s
 - szerokość wiązki 8 mm x 8 mm
- **Tarcza**, masa ok 1kg, 3x3x130 cm³, utrzymywana w temperaturze 60mK, najzimniejszy punkt w CERN. Tarcza znajduje się w silnym polu magnetycznym 2.5 T. Niska temperatura i silne pole jest potrzebne, aby utrzymać polaryzację tarczy. Technika polaryzacji to oddzielne zagadnienie, pewne związki z jądrowym rezonansem magnetycznym → medycyna.



COMPASS @ CERN trochę detali...

- detektory
 - ponad 350 płaszczyzn używanych w eksperymencie.
 - kilkanaście różnych typów detektorów
 - wielkość od 4x4 cm² do 5.5x2.5 m²
 - zdolność rozdzielcza 5 μm do 3.5 mm
 - wyznaczamy: pozycje, kąty, wspólne wierzchołki cząstek
- magnesy
 - zakrzywiają tory cząstek naładowanych, $r = 0.3 \int Bdl/p$
 - cząstki dodatnie i ujemne zakrzywane są w przeciwne strony
 - energia do zasilania magnesów wystarcza na ok. 1000 gospodarstw domowych



- identyfikacja cząstek

- elektrony-inne: elektrony (bardzo mała masa spoczynkowa) można wyhamować w materiałach lekkich np. scyntylatory, szkło, podczas gdy inne cząstki tracą minimalne wartości energii. Idea działania kalorymetrów elektromagnetycznych (także detekcja fotonów) kalorymetry mają za zadanie nie tylko zatrzymać dane cząstki ale także zmierzyć ich energie.
- hadrony-miony: kalorymetry hadronowe, aby zatrzymać hadron potrzeba 1-2+...m ołowiu, uranu itp. (zależy od energii) miony znowu tracą niewiele energii. Do podwyższenia czystości mionów używa się filtrów mionowych (żelazo, beton (cena)).
- typy hadronów: Ze względu na duże energie cząstki poruszają się szybciej od prędkości światła w danym ośrodku → emisja promieniowania Cherenkova → emisja fotonów pod określonym kątem biegunowym. W detektorze widać pierścienie fotonów. Znając pęd i rozmiar pierścienia można oszacować masę cząstki przechodzącej przez detektor.



Podsumowanie

- czy jedynie kwarki budują spin nukleonu? **NIE**
- jaki jest wkład gluonów?
- **COMPASS** szuka odpowiedzi na to pytanie
- proste idee pomiarów....skomplikowana aparatura pomiarowa