O spinie – kilka spraw ciekawych

Barbara Badełek

Uniwersytet Warszawski i Uniwersytet Uppsalski

Nauczyciele fizyki w CERN
20–26 maja 2007

Treść

1. Wprowadzenie
2. Supersymetria
3. Doświadczenie Sterna–Gerlacha
4. Anomalny moment magnetyczny elektronu i mionu
5. Doświadczenie „$g_\mu - 2$" w BNL
6. Zagadka spinu protonu – współpraca COMPASS w CERN
7. Podsumowanie

Definicja spinu

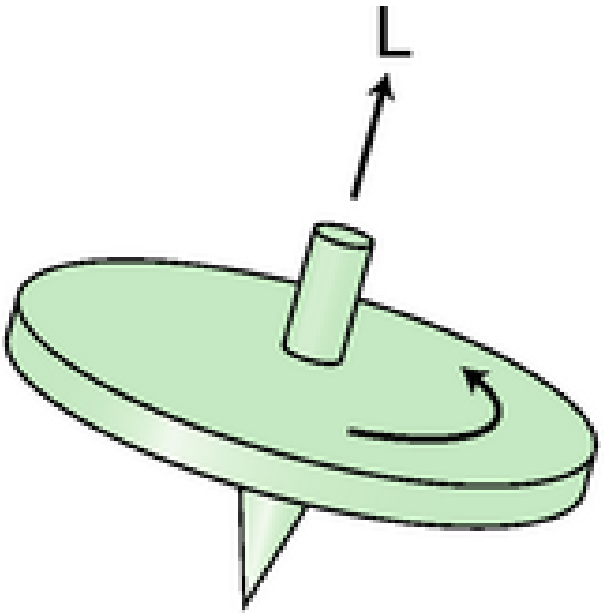
[スピン：くるくる回る“コマ磁石”]

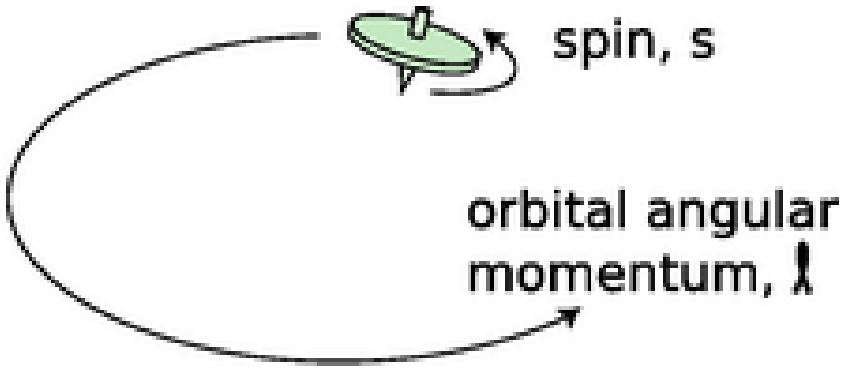
この“スピン”とは一体どういう性質のことでしょうか?

物質を構成している基本的粒子である陽子や電子は、あたかもコマのように自分自身が回転している性質をもっています。コイルに電流を流すと電磁石ができるように、電気をもった陽子や電子がくるくる回るのですから、小さな磁石となります。

スピンはその回転に対応して、上向きとか下向きとして区別されます。

Definicja momentu pędu orbitalnego i spinowego





SPIN: własny moment pędu obiektu, mierzony w jego układzie spoczynkowym. Jest to skwantowana cecha obiektów małych.

Motto

“Polarisation data has often been the graveyard of fashionable theories. If theorists had their way, they might well ban such measurements altogether out of self-protection.”

J.D.Bjorken, 1987

Do czego służy spin?

Fluctuations and Market Friction in Financial Trading

Bernd Rosenow
Institut für Theoretische Physik, Universität zu Köln, D-50937 Köln, Germany
(May 15, 2006)

We study the relation between stock price changes and the difference in the number of sell and buy orders. Using a soft spin model, we describe the price impact of order imbalances and find an analogy to the fluctuation-dissipation theorem in physical systems. We empirically investigate fluctuations and market friction for a major US stock and find support for our model calculations.

PACS numbers: 05.45.Tp, 89.90.+n, 05.40.-a, 05.40.Fb

d-mat/0107018 v2 6 Jul 2001

The unpredictable up and down movements in the stock market have always captured the interest and imagination of investors. The scientific investigation of these phenomena started with Bachelier's comparison of stock price dynamics with a random walk [1]. This study has been refined in many respects [2]. Interest has been devoted to the precise shape of the distribution of returns (difference of the logarithm of stock prices at different times), which is characterized by a high probability for large fluctuations [3–6].

After it was realized that large price fluctuations tend to cluster together in time, stock price returns were described by models of volatility (standard deviation of returns) changing in time [7,8]. This effect is captured in time series models, in which the volatility at a given time depends on the magnitude of previous returns [9,10]. It has been actively investigated how the stochastic properties of price dynamics can be related to the market microstructure, i.e. the rules and motivations according to which agents act in a financial market. Although the details of models differ [11–15], they have been successful

sell orders (order imbalance), which acts as an external force. We study the dependence of stock price changes on order imbalance empirically by using the method of data analysis and some of the results of [21,22]. We find that the empirical results agree well with our model.

Model calculation: The observable quantity we are interested in is the logarithmic stock price changes within a time interval Δt

$$G_{\Delta t}(t) = \ln S(t) - \ln S(t - \Delta t) \ , \qquad (1)$$

where $S(t)$ is the price of a given stock at time t. Transaction prices at a stock exchange lie usually in a finite interval between the bid price (the price a trader offers to pay for a stock) and the ask price (the price at which a dealer is willing to buy the stock). In addition, the historical prices studied take only discrete (tick) values. This motivates to model price changes by a spin model, and for the virtue of easier analytical calculations by a soft spin model [23].

The spin variable we use is the "instantaneous return"

Outline

1. Wprowadzenie
2. Supersymetria
3. Doświadczenie Sterna–Gerlacha
4. Anomalny moment magnetyczny elektronu i mionu
5. Doświadczenie „$g_\mu - 2$" w BNL
6. Zagadka spinu protonu – współpraca COMPASS w CERN
7. Podsumowanie

Wiadomości ogólne

- Moment magnetyczny ,,orbitalny'' i ,,spinowy'' cząstki o własnościach: $m, q, \vec{L}, \vec{s}$:

$$\vec{\mu}_{L(s)} = g_{L(s)}\mu_B \frac{\vec{L}(\vec{s})}{\hbar} \quad \text{gdzie :} \quad \mu_B = \frac{\mid q \mid \hbar}{2m} \approx 9.27 \cdot 10^{-24}\text{J/T} \quad (\text{dla } \mathrm{e}^-)$$

$$g_L = 1, \quad g_s^e = 2,00232..., \quad g_s^p = 5.586...$$

$q = \pm 1.602 \cdot 10^{-19}$C (pozytrony, protony / elektrony, antyprotony)

- Wartość spinu: $\mid \vec{s} \mid = \sqrt{s(s+1)} \cdot \hbar, \quad \hbar = 1.05 \cdot 10^{-34}$Js
- a wartość rzutu spinu na wybraną oś: $s_z = \{-s, -s+1, ..., s-1, s\}\hbar$
- $s_z = \pm\frac{\hbar}{2}$ (,,do góry'' – ,,na dół''; elektrony, miony, protony,... i ich antycząstki)
- g – tzw. stosunek gyromagnetyczny; równy 2 dla cząstek punktowych o spinie 1/2 $\hbar$. Elektron chyba punktowy (rozmiar $\lesssim$ 0.001 fm); dlaczego więc g_s^e jest różne od 2 ??? Cel wielu pomiarów: $a_e \equiv (g_s^e - 2)/2$
- Polaryzacja wiązki cząstek o spinie 1/2 jest:

$$P = \frac{N^{\rightarrow} - N^{\leftarrow}}{N^{\rightarrow} + N^{\leftarrow}} \qquad 0 \leq P \leq 1$$

Głęboka i ciekawa fizyka ukryta w fakcie, że $g_s^e \neq 2$!

Outline

1. Wprowadzenie
2. Supersymetria
3. Doświadczenie Sterna–Gerlacha
4. Anomalny moment magnetyczny elektronu i mionu
5. Doświadczenie „$g_\mu - 2$" w BNL
6. Zagadka spinu protonu – współpraca COMPASS w CERN
7. Podsumowanie

Supersymetria

- Symetria „oczekiwana"; transformuje

$$\text{fermiony} \leftrightarrows \text{bozony}$$

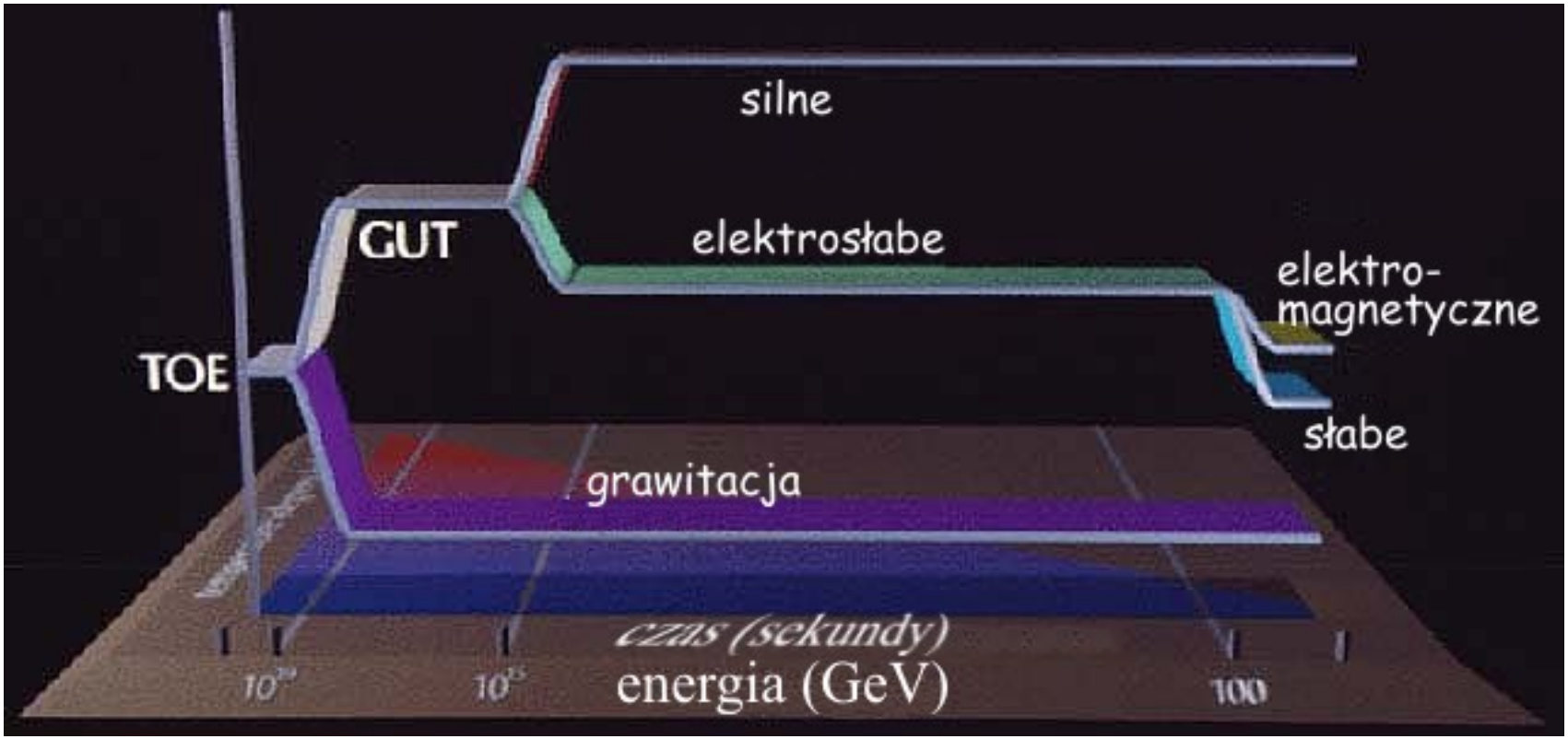
- Dla fermionów – zasada Pauliego; dla bozonów – nie!
- Zakłada więc istnienie partnerów znanych cząstek:

cząstka	spin ($\hbar$)	scząstka	spin ($\hbar$)
q	1/2	skwark, $\tilde{q}$	0
l	1/2	slepton, $\tilde{l}$	0
γ	1	fotino, $\tilde{\gamma}$	1/2
g	1	gluino, $\tilde{g}$	1/2
W, Z	1	wino, $\tilde{W}$; zino, $\tilde{Z}$	1/2
H	0	higgsino, $\tilde{H}$	1/2
G	2	grawitino, $\tilde{G}$	3/2

- Jest (oczywiście) łamana.
- Tworzy ramy unifikacji wszystkich oddziaływań.

Wielka Unifikacja

Ostateczna teoria (TOF) opisywałaby jedno oddziaływanie, z którego narodził się (?) Wszechświat

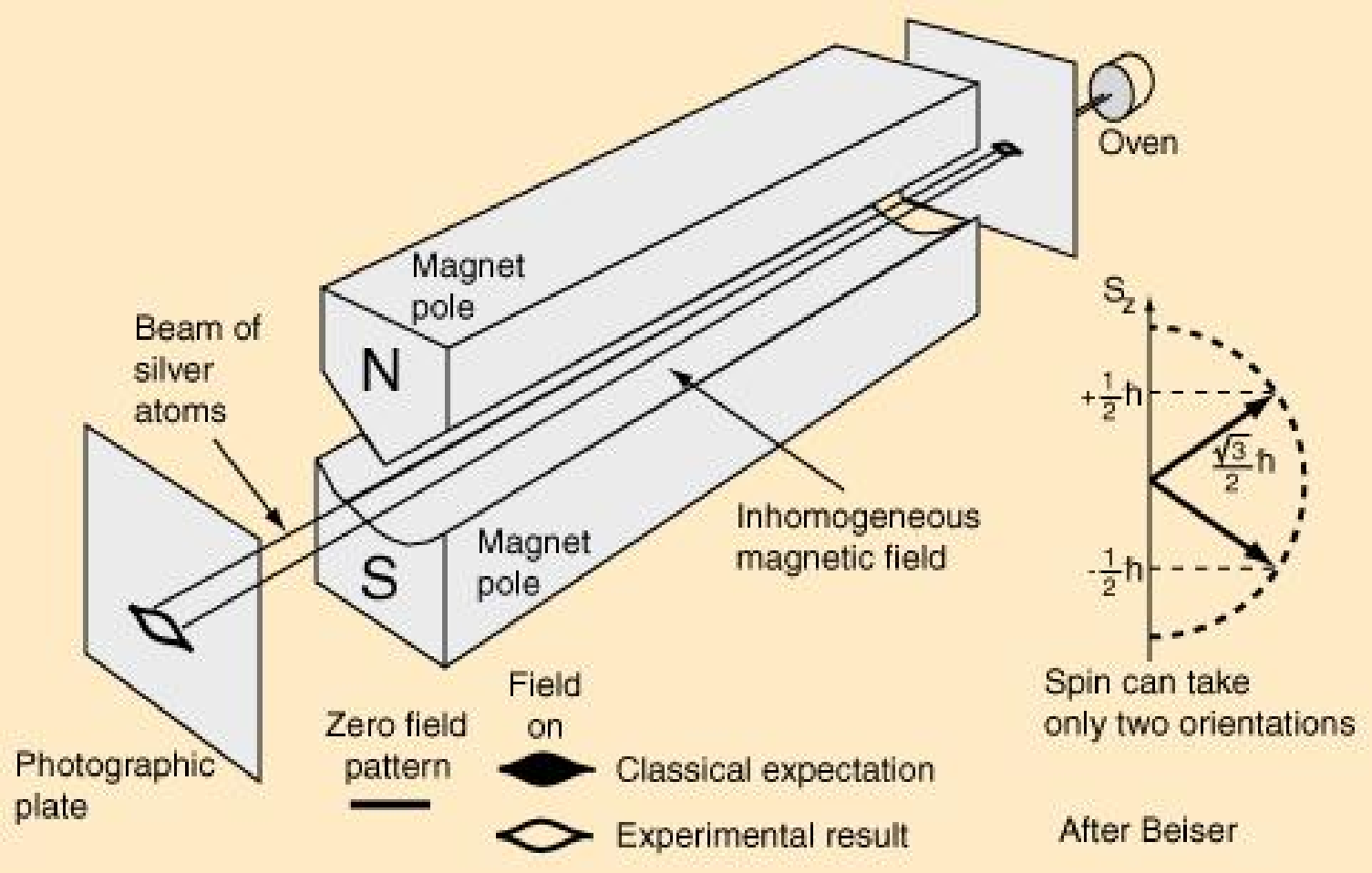


Outline

1. Wprowadzenie
2. Supersymetria
3. Doświadczenie Sterna–Gerlacha
4. Anomalny moment magnetyczny elektronu i mionu
5. Doświadczenie „$g_\mu - 2$" w BNL
6. Zagadka spinu protonu – współpraca COMPASS w CERN
7. Podsumowanie

Doświadczenie Sterna–Gerlacha (1922)

“Right experiment, wrong theory”



http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hphys.html

Doświadczenie Sterna–Gerlacha, c.d.

“Right experiment, wrong theory”

- Rozszczepienie wiązki pod wpływem siły: $\vec{F} = -\vec{\nabla}(-\vec{\mu}\vec{B})$ Dowód na istnienie i na kwantowy charakter spinu !
- Atomy srebra, w ktorych poza zamkniętymi powłokami jest jeden elektron, walencyjny; jego jedyny moment pędu to spin.
- Uhlenbeck i Goudsmit (1925 – 1926) $\longrightarrow$ SPIN dla wytłumaczenia widm atomowych ale BEZ ODNIESIENIA SIĘ do wyniku doświadczenia Sterna – Gerlacha !
- Pytanie: czy spin *swobodnego* elektronu też można demonstrować w ten sposób?
- Spin protonu wyznaczony znacznie później w doświadczeniu typu Sterna–Gerlacha.

http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hphys.html

Doświadczenie Sterna–Gerlacha, c.d.

“Right experiment, wrong theory”

PHYSICAL REVIEW A VOLUME 60, NUMBER 1 JULY 1999

Observing the spin of a free electron

B. M. Garraway[1] and S. Stenholm[2]
[1]*Sussex Centre for Optical and Atomic Physics, School of Chemistry, Physics, and Environmental Sciences, University of Sussex, Falmer, Brighton BN1 9QJ, England*
[2]*Physics Department, Royal Institute of Technology, Lindstedtsvägen 24, S-10044 Stockholm, Sweden*
(Received 8 October 1998)

Long ago, Bohr, Pauli, and Mott argued that it is not, in principle, possible to measure the spin components of a free electron. One can try to use a Stern-Gerlach type of device, but the finite size of the beam results in an uncertainty of the splitting force that is comparable with the gradient force. The result is that no definite spin measurement can be made. Recently there has been a revival of interest in this problem, and we will present our own analysis and quantum-mechanical wave-packet calculations which suggest that a spin measurement is possible for a careful choice of initial conditions. [S1050-2947(99)00207-3]

PACS number(s): 03.65.Bz, 03.75.−b, 14.60.Cd, 34.80.Nz

I. INTRODUCTION

The spin of the electron plays a central role in the explanation of atomic spectra. It turns out to endow the electron with a magnetic moment of magnitude $(e\hbar/2m)$, which carries the signature of its quantum origin in the factor $\hbar$. The magnetic moment of the orbital motion of the electron in an atom is of the same order, but it can be taken to a classical value by increasing the angular momentum quantum number. This has, indeed, been possible in Rydberg atoms, where nearly classical wave packets have been constructed and observed experimentally (see, for example, Ref. [1]). The spin to be unmeasurable in a macroscopic apparatus of the type required by Bohr.

When the anomalous g-factor of the electron was measured by Dehmelt in a rf trap [10], it constituted a measurement of the electron spin. The issue created a controversy: was the spin trapped or free? According to Sir Rudolf Peierls, “It is free in the sense intended by Bohr. This was one of the cases where Bohr was wrong” [11]. Thus one may argue that the issue is settled; we can measure the spin of the “free” electron. However, the original argument of Bohr and Pauli still remains. It may well be worthwhile to investigate it in detail, to see how far it holds, and what

Dygresja: przypomnienie zasady nieoznaczoności

Zachowanie energii zdefiniowane tylko z dokładnością do ΔE takiego, że:

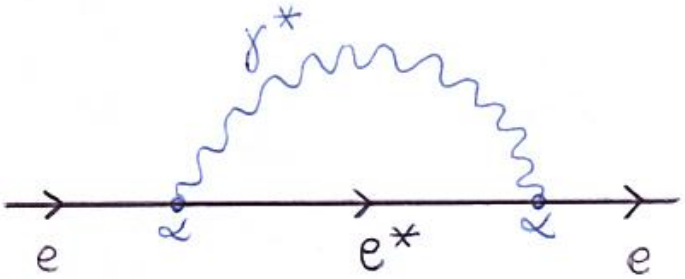
$$\Delta E \cdot \Delta t \gtrsim \frac{\hbar}{2}$$

- Ważne! Możliwe więc dowolne fluktuacje jednych cząstek w drugie albo kreacja i anihilacja par cząstka – antycząstka.
- Ważne! Istnienie cząstek wirtualnych wywiera mierzalny wpływ na cząstki rzeczywiste!

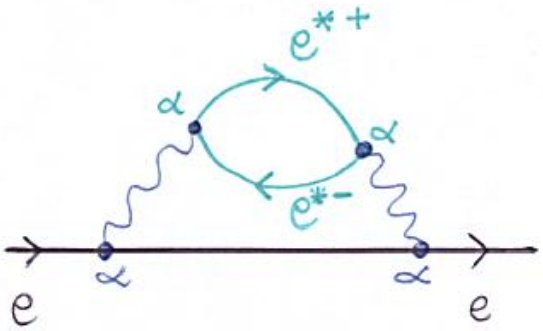
Ładunek elementarny ?

Z dużej odległości

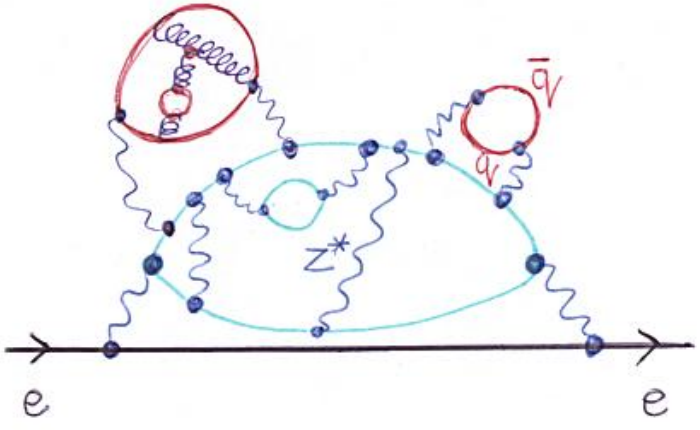
z bliższej odległości



z bliska

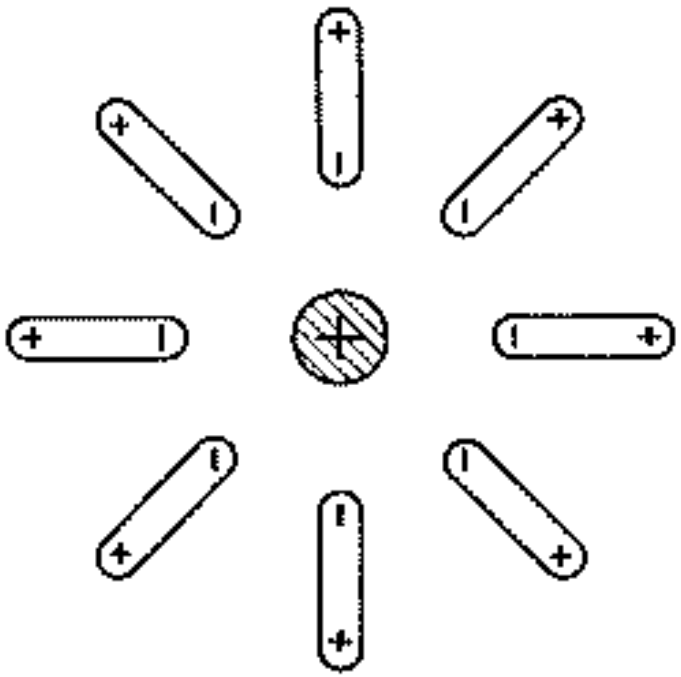


z bardzo bliska



Polaryzacja próżni

Polaryzacja dielektryka
przez ładunek punktowy:



Podobnie polaryzacja próżni przez pary cząstka – antycząstka

Outline

1. Wprowadzenie
2. Supersymetria
3. Doświadczenie Sterna–Gerlacha
4. Anomalny moment magnetyczny elektronu i mionu
5. Doświadczenie „$g_\mu - 2$" w BNL
6. Zagadka spinu protonu – współpraca COMPASS w CERN
7. Podsumowanie

Anomalny moment magnetyczny elektronu i mionu

$a_{e(\mu)} \neq 0$ bo elektron (mion) otacza się cząstkami wirtualnymi!

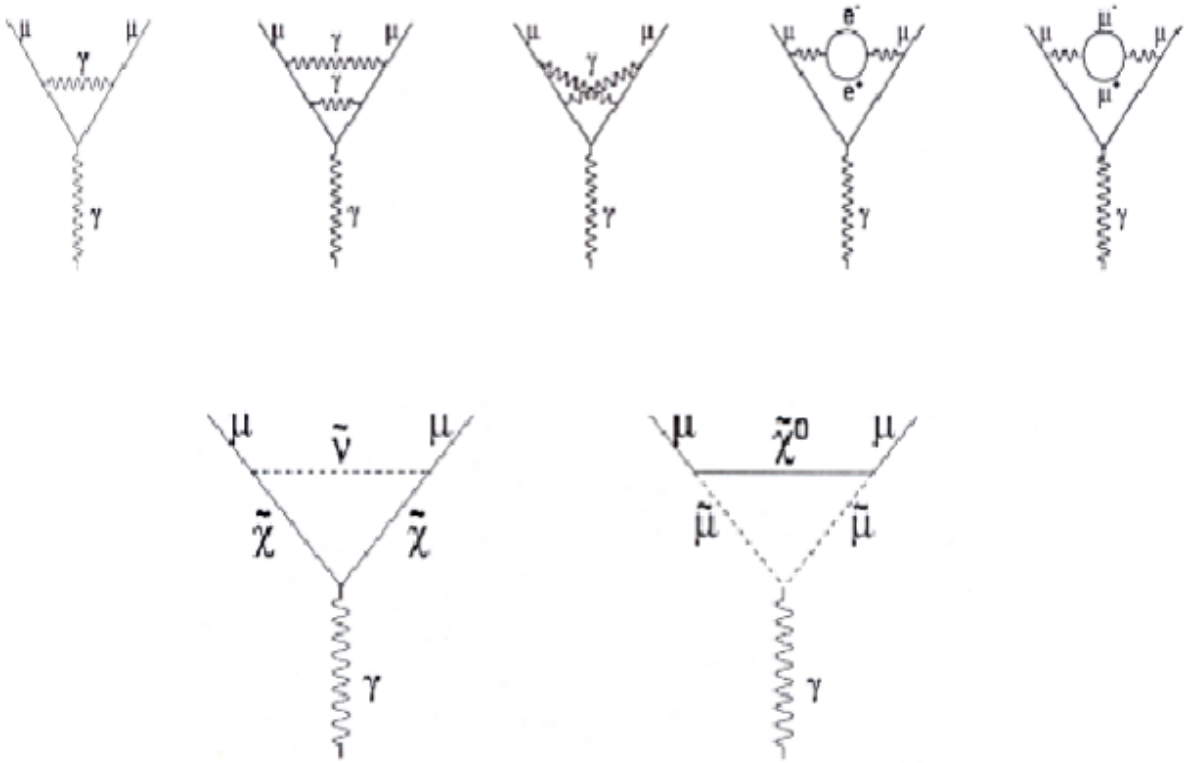
$a_{e(\mu)} \neq 0$ uwidacznia się w oddziaływaniu e (μ) z zewnętrznym polem $\vec{B}$.

Dla elektronu:

- a_e(dośw.) = 1 159 652 188 (4) $\cdot 10^{-12}$
- Obliczono, że wkład do a_e od cząstek cięższych niż elektrony: $\sim 4 \cdot 10^{-12}$
  a więc nie mozna dowiedzieć się niczego o ewentualnym istnieniu nowych cząstek.
- Jednak: $(m_\mu/m_e)^2 \approx 40\,000$ czylli a_μ jest 40 000 razy bardziej czułe na „nową fizykę"
  $\longrightarrow$ konieczny pomiar a_μ.

Anomalny moment magnetyczny elektronu i mionu, c.d.

Mion oddziaływuje z polem magnetycznym oraz otacza się cząstkami wirtualnymi – różnymi ale także np. supersymetrycznymi !

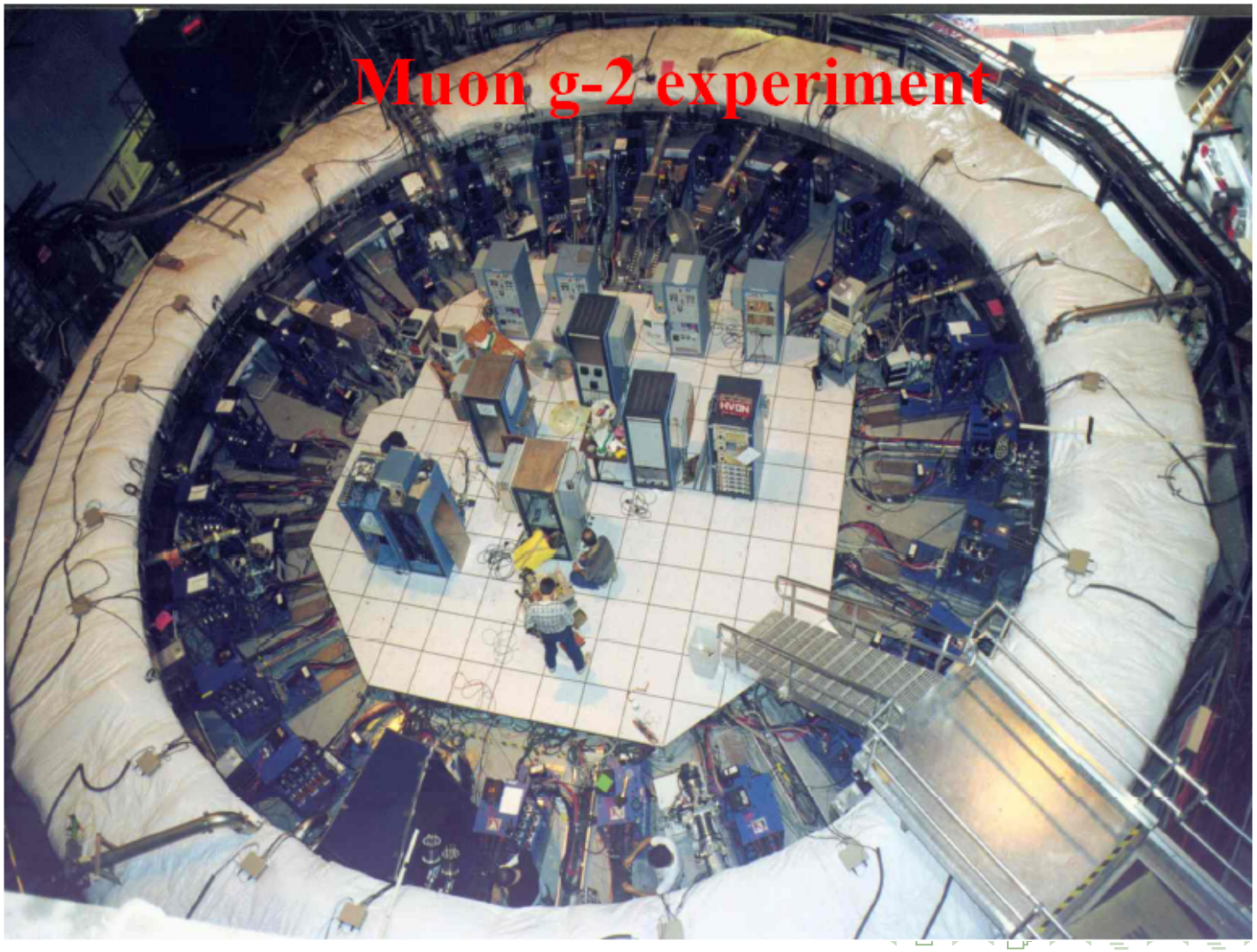


Być może to dobra metoda odkrycia cząstek supersymetrycznych !

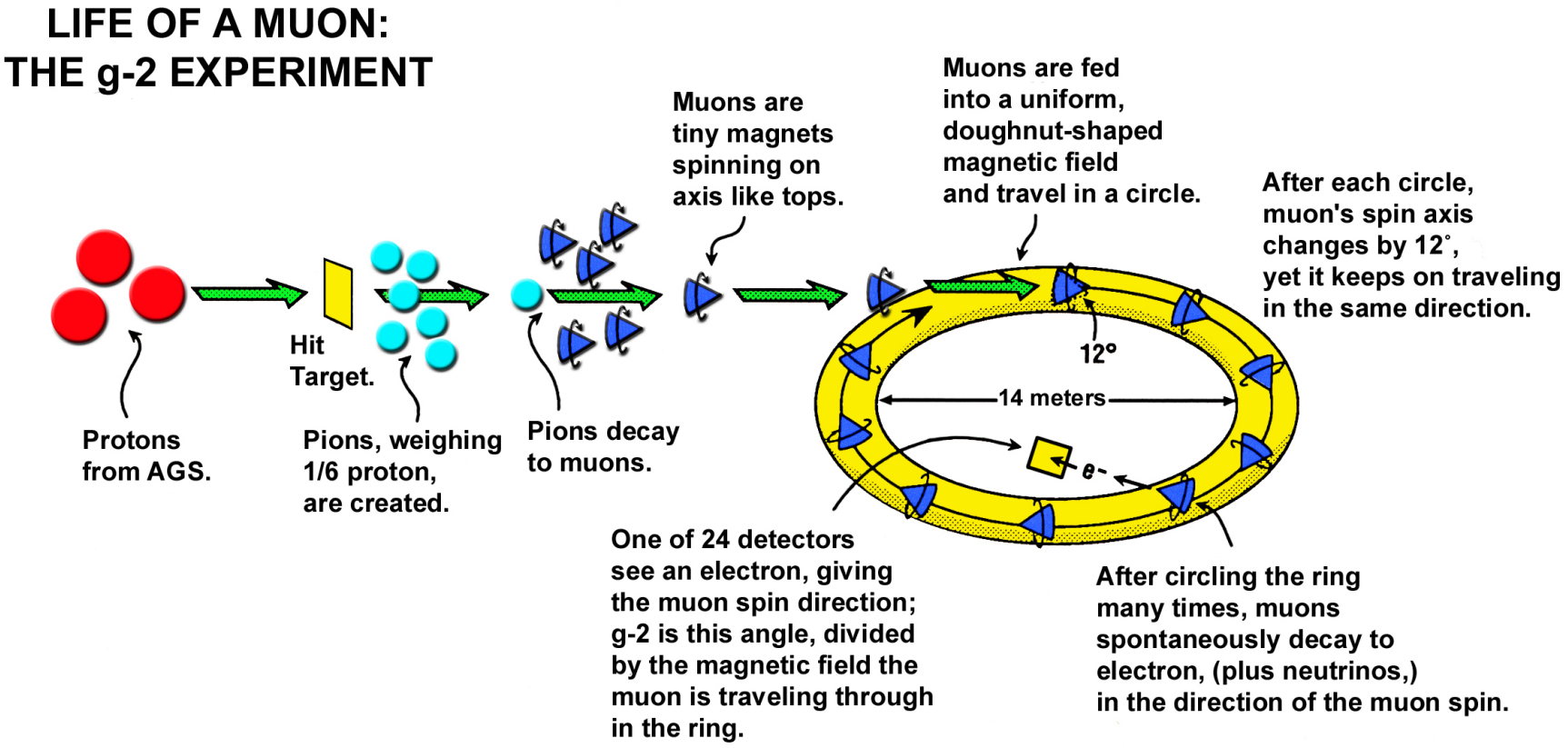
Outline

1. Wprowadzenie
2. Supersymetria
3. Doświadczenie Sterna–Gerlacha
4. Anomalny moment magnetyczny elektronu i mionu
5. Doświadczenie „$g_\mu - 2$" w BNL
6. Zagadka spinu protonu – współpraca COMPASS w CERN
7. Podsumowanie

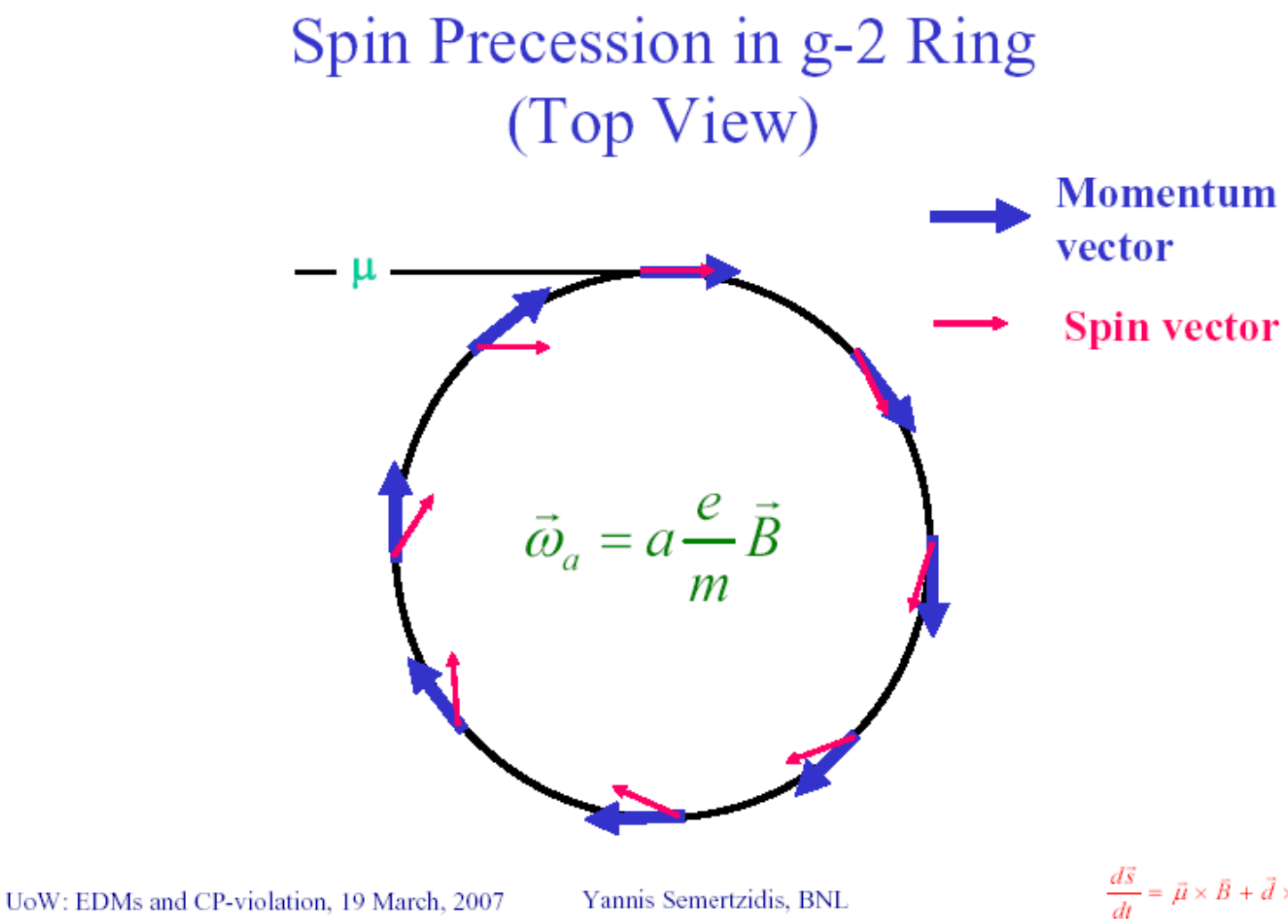
Doświadczenie „$g_\mu - 2$" w BNL (USA)



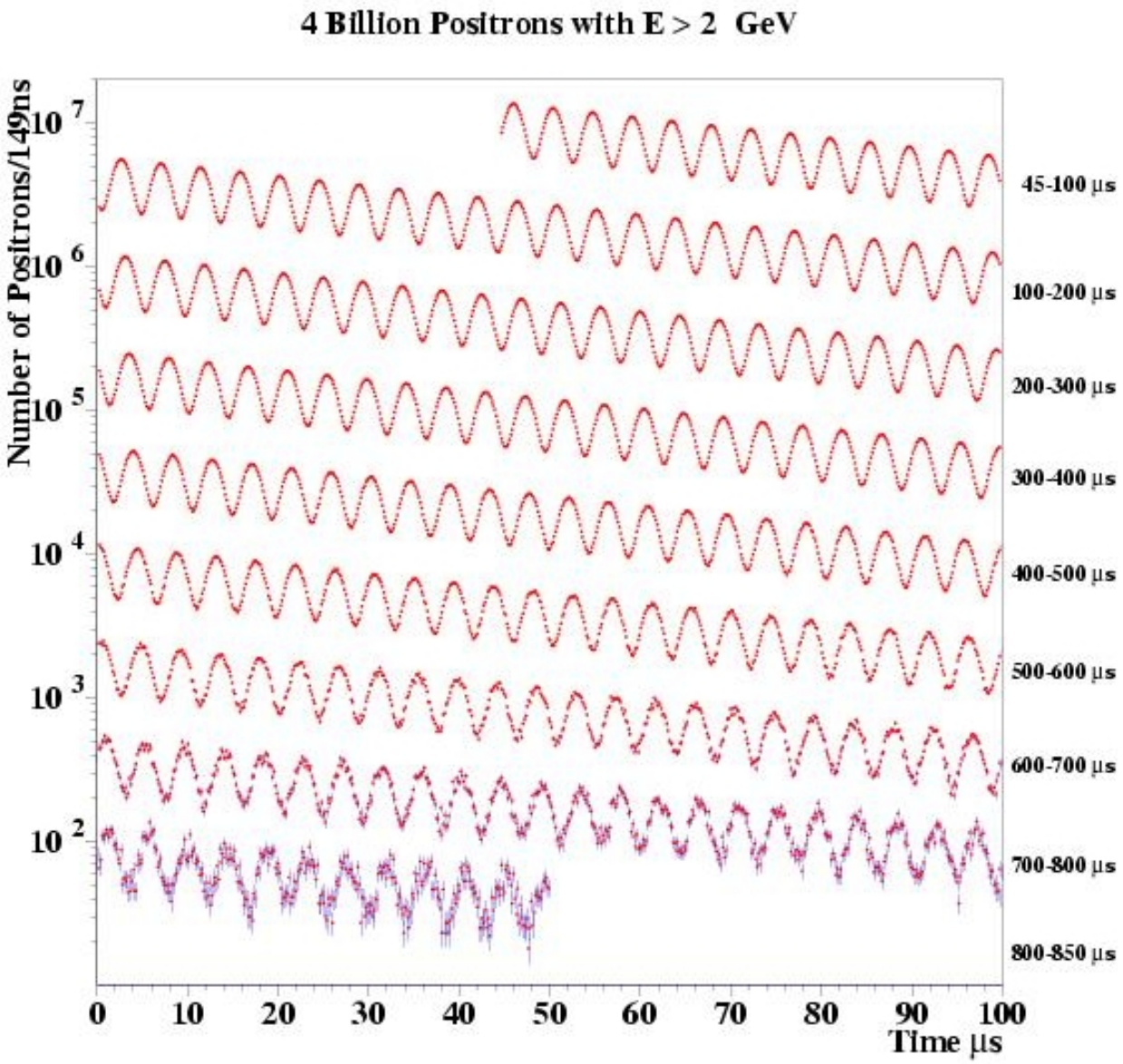
Doświadczenie „$g_\mu - 2$" w BNL, c.d.



Doświadczenie „$g_\mu - 2$" w BNL, c.d.



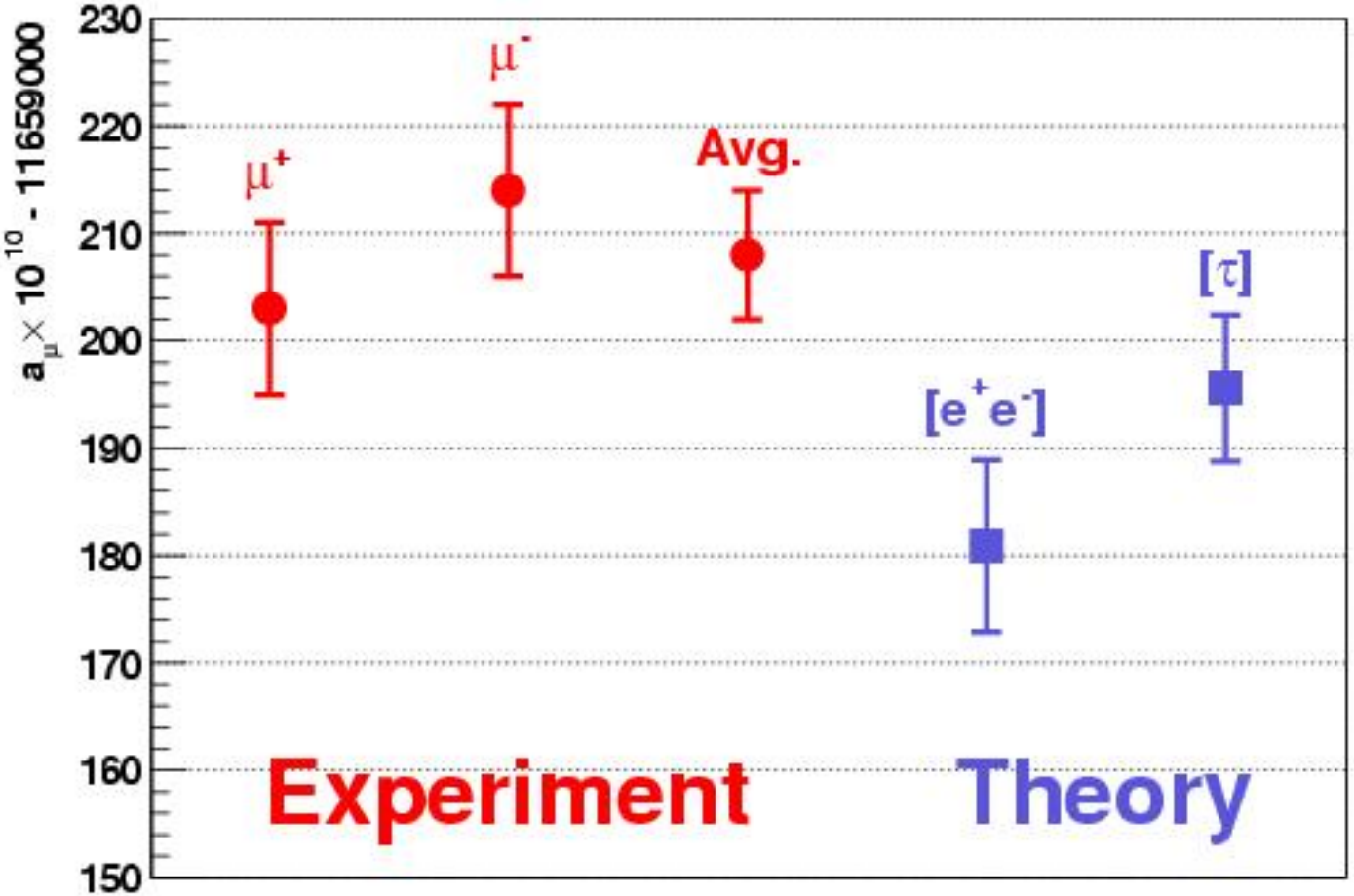
Doświadczenie „$g_\mu - 2$" w BNL, c.d.



Doświadczenie „$g_\mu - 2$″ w BNL, c.d.

Wyniki: różnica z przewidywaniem Modelu Standardowego jest 2.7 (1.4) odchyleń standardowych („błędów″).

Co to znaczy ?



Outline

1. Wprowadzenie
2. Supersymetria
3. Doświadczenie Sterna–Gerlacha
4. Anomalny moment magnetyczny elektronu i mionu
5. Doświadczenie „$g_\mu - 2$" w BNL
6. Zagadka spinu protonu – współpraca COMPASS w CERN
7. Podsumowanie

Model kwarkowy hadronów

- Wszystkie własności hadronów powinny się dać odtworzyć z własności kwarków.
- Ładunki - OK, np.: proton$\equiv$ (uud), $\frac{2}{3}e + \frac{2}{3}e - \frac{1}{3}e = +1e$
- Momenty magnetyczne - OK:

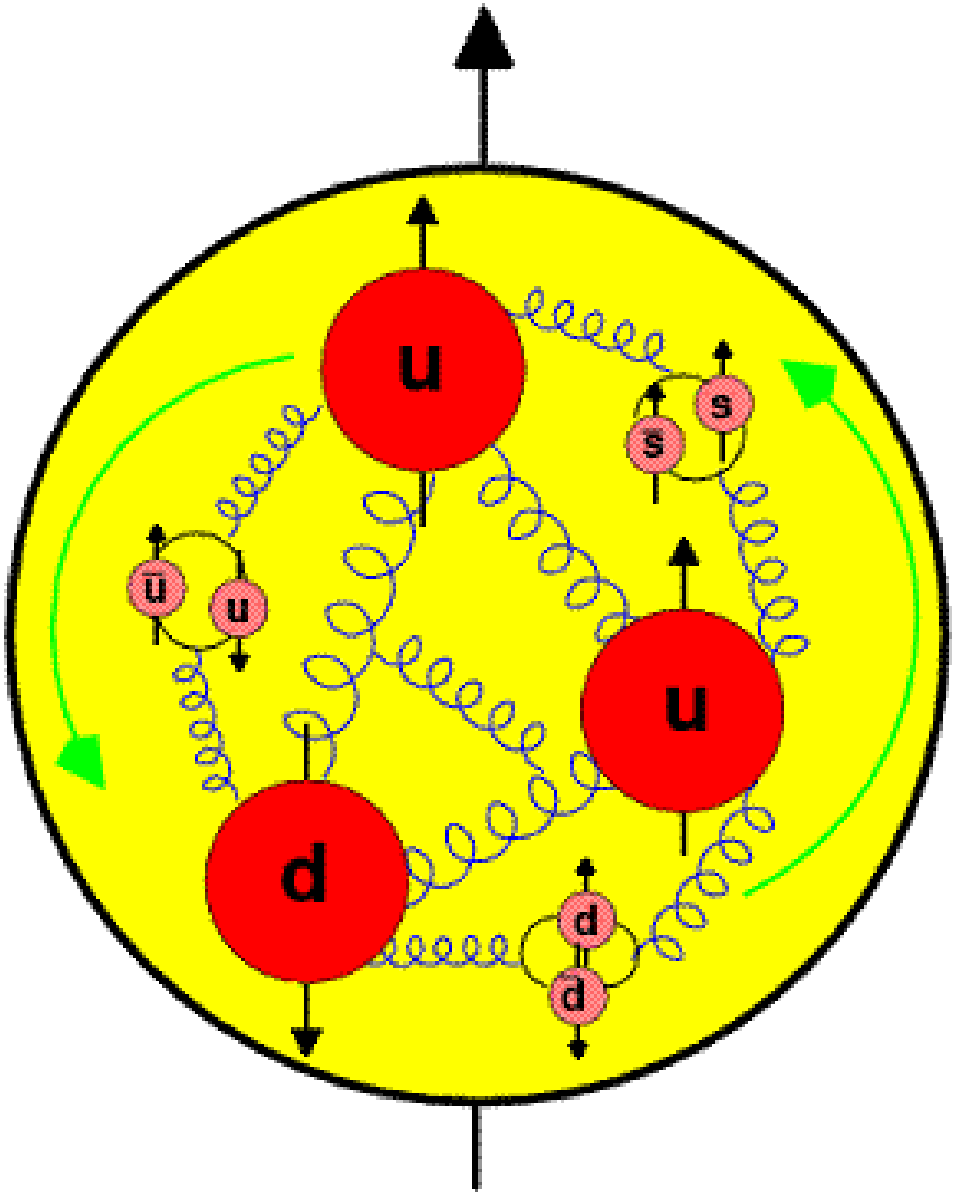
TABLE 6.5 A comparison of the observed magnetic moments of the $\frac{1}{2}^+$ baryon octet, and the predictions of the simple quark model, Eqs. (6.25a) and (6.26), for $m_u = m_d = 336\,\mathrm{MeV}/c^2$ and $m_s = 510\,\mathrm{MeV}/c^2$

Particle	Prediction (μ_N)	Experiment (μ_N)
p(938)	2.79	2.793[a]
n(940)	−1.86	−1.913[a]
Λ(1116)	−0.61	−0.613 ± 0.004
Σ^+(1189)	2.69	2.458 ± 0.010
Σ^-(1197)	−1.04	−1.160 ± 0.025
Ξ^0(1315)	−1.44	−1.250 ± 0.014
Ξ^-(1321)	−0.51	−0.651 ± 0.003

[a]The errors on the proton and neutron magnetic moments are of the order 6×10^{-8} and 5×10^{-7} respectively.

- SPINY ?

Struktura protonu pod mikroskopem



Model kwarkowy hadronów, c.d.

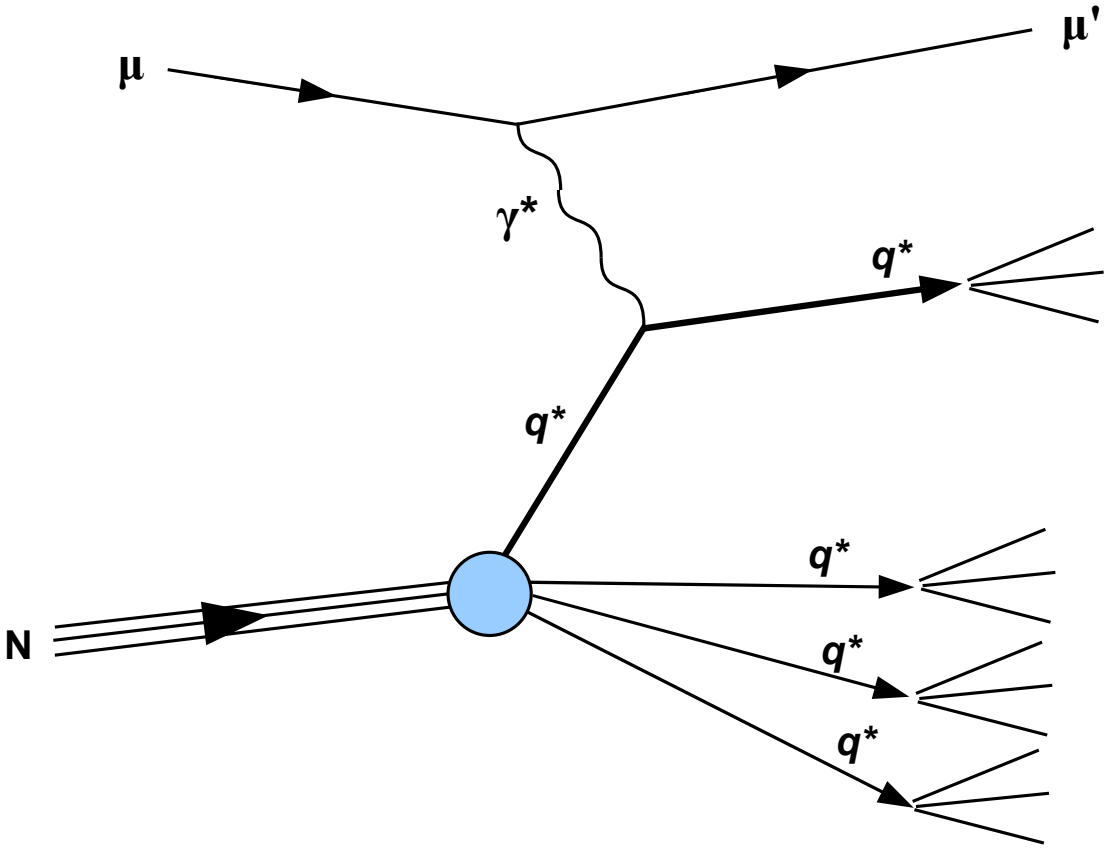
- A więc spiny. Wszystkie kwarki mają spin równy $\sqrt{\frac{1}{2}(\frac{1}{2}+1)}\hbar$, a wszystkie gluony – równy $\sqrt{1(1+1)}\hbar$.
- Wartość liczby kwantowej rzutu spinu nukleonu (w jednostkach $\hbar$) można rozłożyć następująco (,,reguła sum''):

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta\mathrm{G} + \Delta\mathrm{L}$$

- tutaj: $\Delta\Sigma$ – wkład do spinu od wszystkich kwarków, $\Delta\mathrm{G}$ – wkład od gluonów, $\Delta\mathrm{L}$ – wkład od momentu orbitalnego kwarków i gluonów.
- Naiwnie oczekujemy: $\Delta\Sigma$ =1, ΔG = 0, inne = 0.
- European Muon Collaboration w CERN (1988): $\Delta\Sigma$ =0.12 $\pm$ 0.09 $\pm$0.14
- Spin Muon Collaboration w CERN, SLAC (USA), HERMES (DESY, Niemcy): $\Delta\Sigma \sim 0.2 - 0.3$
- Imponujący rozwój badań od 1988: SLAC, SMC, HERMES, JLAB (USA), COMPASS (CERN), RHIC Spin (BNL, USA). Liczne prace teoretyczne.
- Konieczny pomiar ΔG !

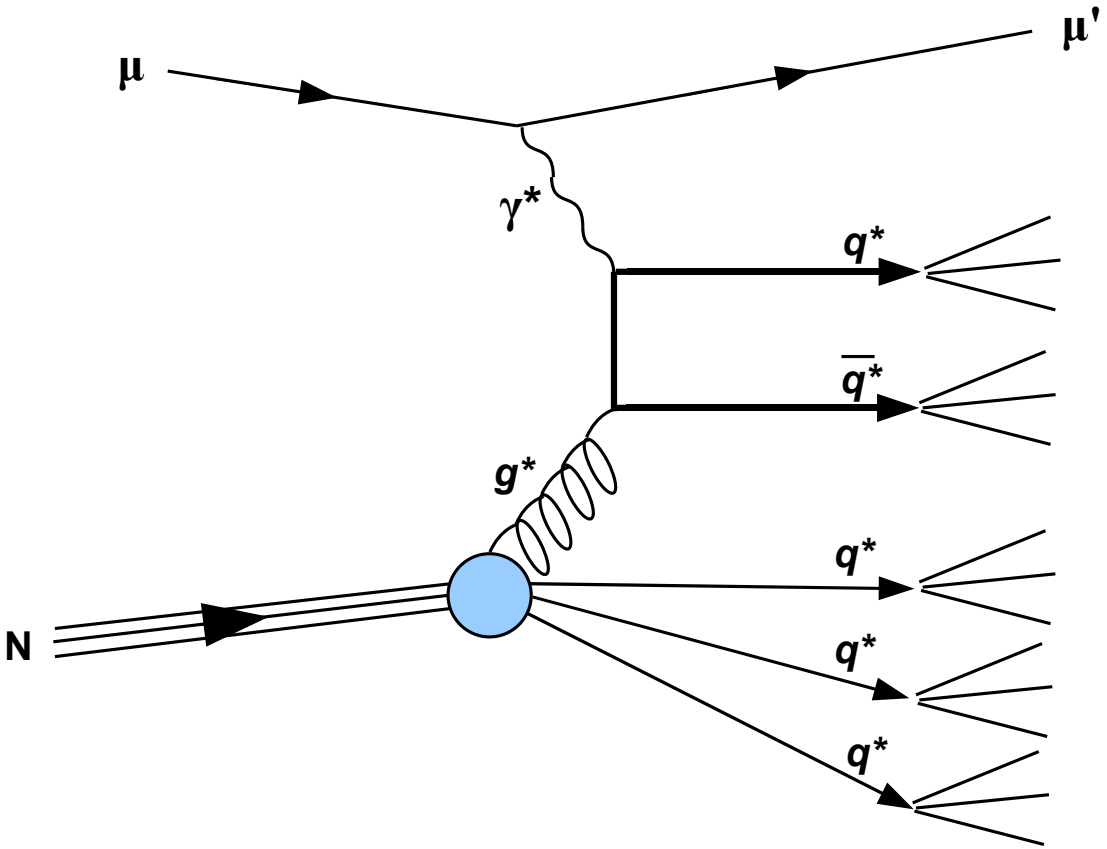
Jak badać kwarkową strukturę nukleonu ?

- Np za pomocą oddziaływania elektromagnetycznego (kwarki mają ładunek!)
- Punktowymi sondami naładowanymi, np.: $e^{\pm}$, $\mu^{\pm}$.
- Przybliżony schemat oddziaływania:



Jak badać gluonową strukturę nukleonu ?

- Gluony nie mają ładunku elektrycznego lecz ładunek silny (tzw. ,, kolor'').
- Jedna z możliwości:

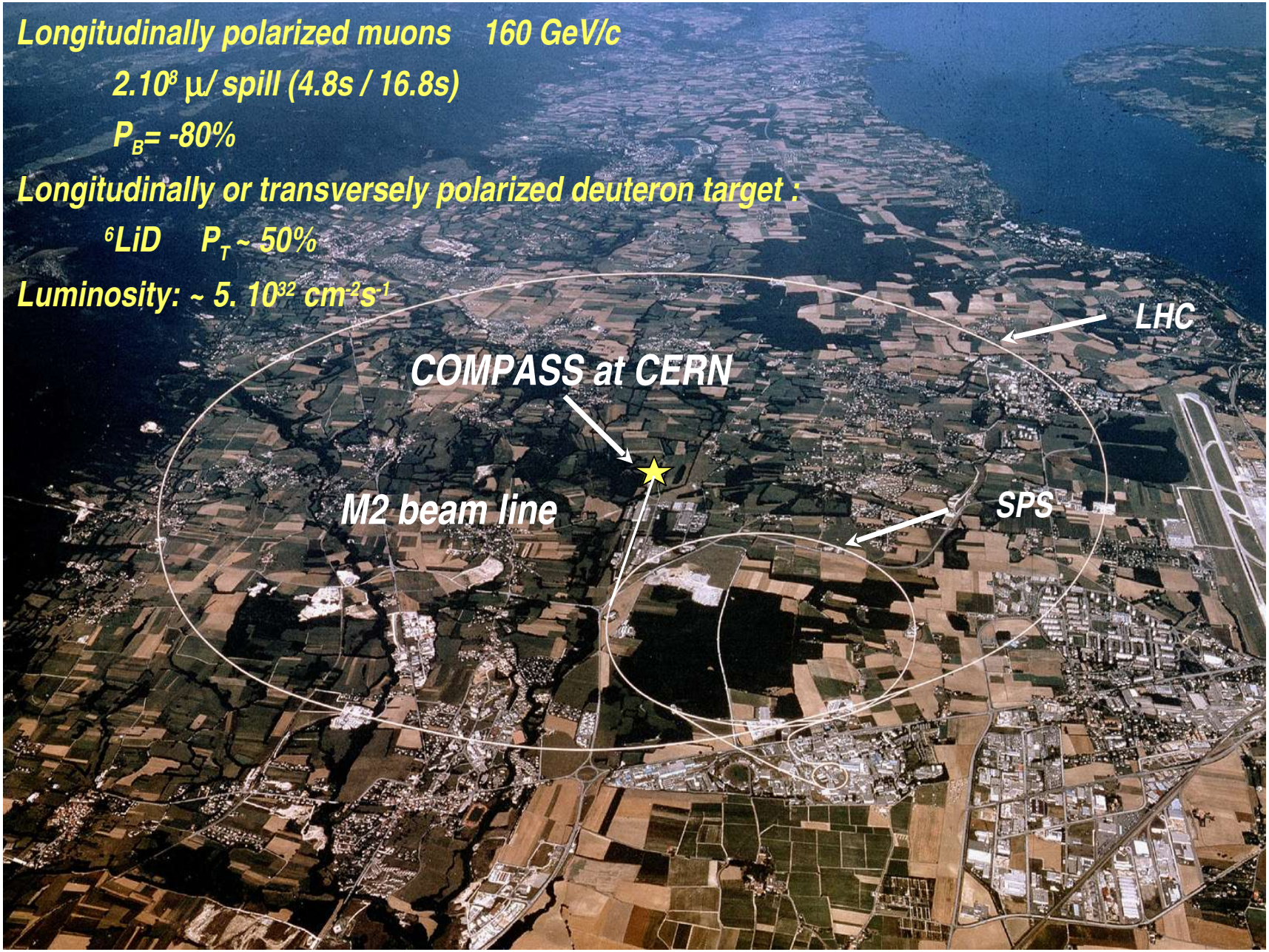


Obecne doświadczenia badające ΔG

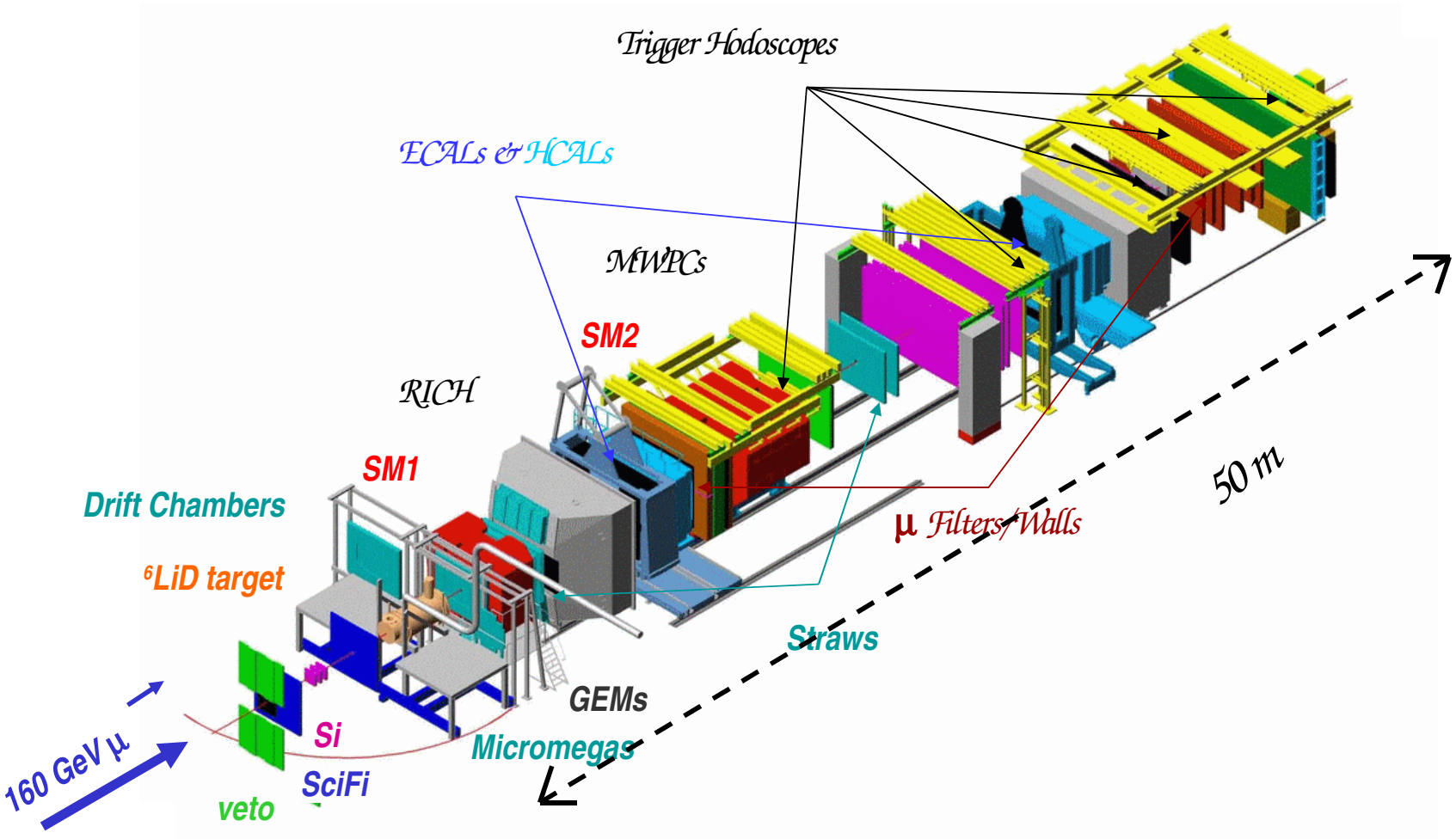
- COMPASS (CERN); $\sim$ 250 fizyków, w tym 10 z Warszawy (Instytut Fizyki Doświadczalnej UW, Instytut Problemów Jądrowych, Instytut Radioelektroniki PW); i
- HERMES (Niemcy); $\sim$ 250 fizyków, w tym 4 z Warszawy (Instytut Problemów Jądrowych);
- STAR, PHENIX (USA); $\sim$ 500 fizyków każde, w tym grupa z Warszawy (Instytut Fizyki PW);
- liczne doświadczenia w Laboratorium Jeffersona (JLAB) w USA.

CO mmon M uon and P roton A pparatus for S tructure and S pectroscopy

$\sim$ 250 physicists
$\sim$ 30 institutes
at the CERN SPS


Longitudinally polarized muons 160 GeV/c
2.10^8 μ/ spill (4.8s / 16.8s)
P_B= -80%
Longitudinally or transversely polarized deuteron target :
^6LiD P_T ~ 50%
Luminosity: ~ 5. 10^32 cm^-2s^-1
LHC
COMPASS at CERN
M2 beam line
SPS

COMPASS Spectrometer



Co mierzymy ?

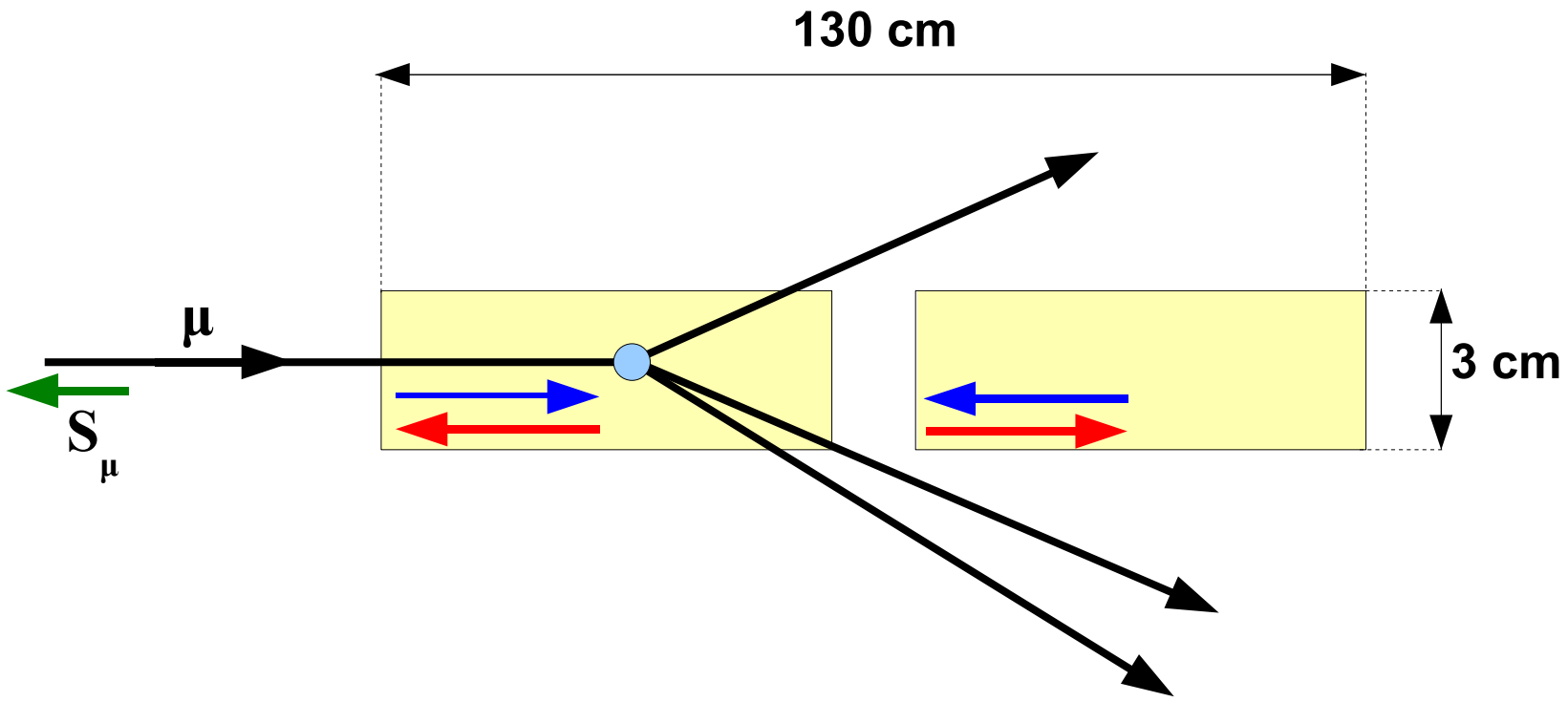
- Pęd mionu – pocisku (teraz około 160 GeV/c);
- polaryzację nukleonu – tarczy (dla protonu jest bliska 100%);
- masy, pędy i kąty (w ograniczonym zakresie) cząstek naładowanych powstających w reakcji;
- Wszystko dla różnych względnych polaryzacji wiązki i tarczy.

W doświadczeniach nad oddziaływaniem spinowym...

- potrzebne są obiekty badane („tarcze") i pociski („wiązki") z ustawionymi spinami
- i o dużej gęstości tych spinów (gęsta wiązka i duże tarcze)
- Wykonuje się pomiar różnicowy (górna strzałka dotyczy kierunku spinu mionu, dolna – spinu protonu w tarczy):

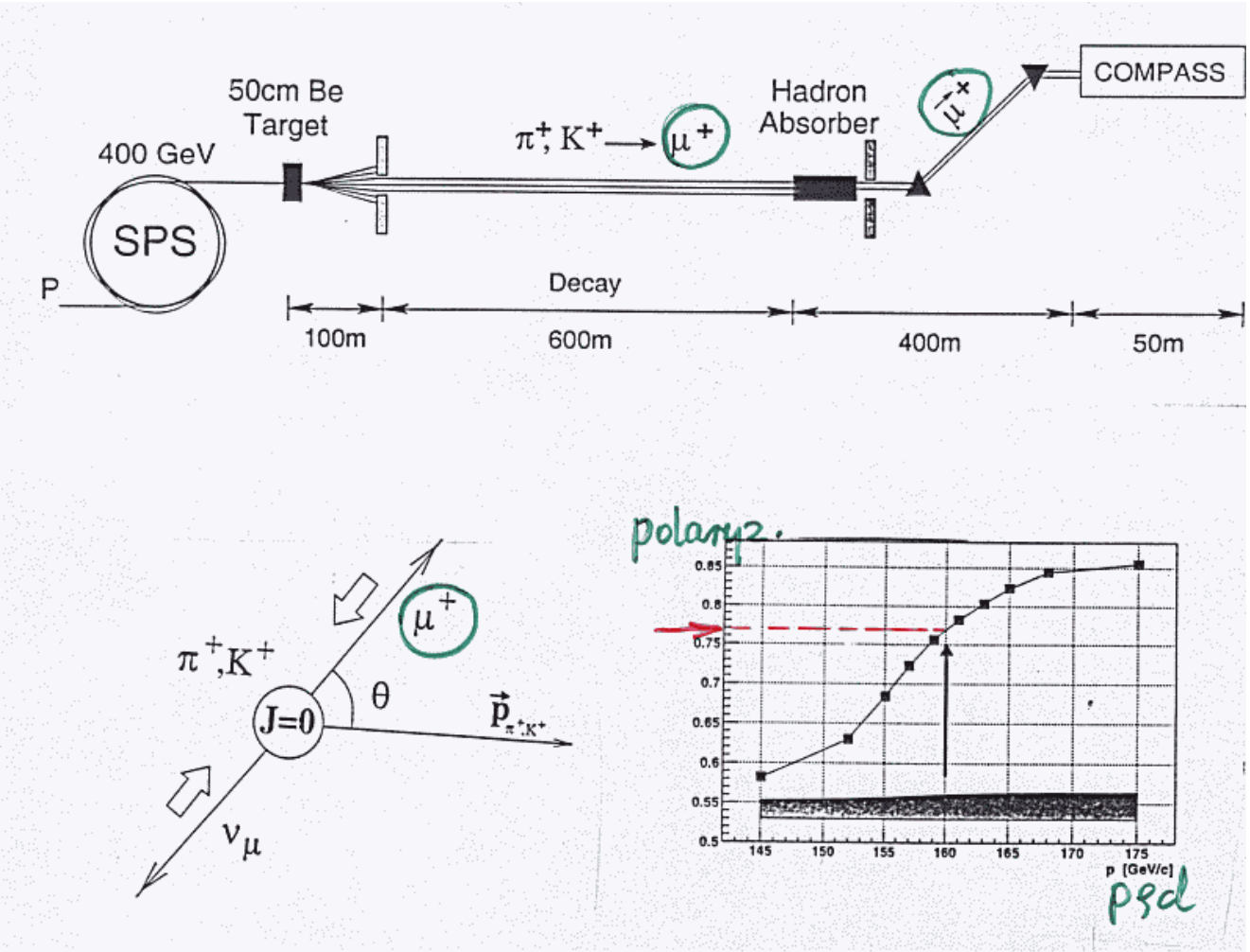
$$\frac{N^{\leftrightarrows} - N^{\rightleftarrows}}{N^{\leftrightarrows} + N^{\rightleftarrows}}$$

- czyli np w tarczy dwuczęściowej (aby uniknąć błędów systematycznych):



Polaryzacja wiązki mionów w COMPASS-ie (***)

- Miony pochodzą z rozpadu pionów, $\pi \longrightarrow \mu\nu_\mu$. Parzystość w tym rozpadzie nie zachowana $\longrightarrow$ polaryzacja μ.
- Polaryzacja zależna od pędu μ; wybrano 160 GeV oraz $P_\mu \approx -0.77$



Polaryzacja tarczy nukleonowej w COMPASS-ie (***)

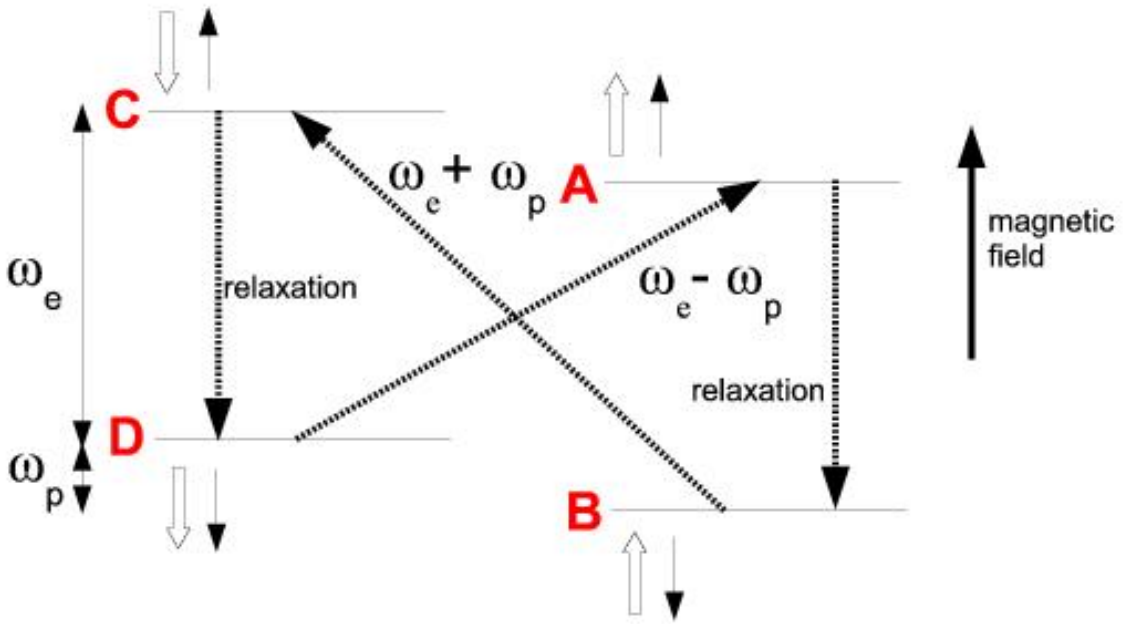
- Polaryzacja:

$$P = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} = \mathrm{tgh}\left(\frac{\vec{\mu}\vec{B}}{2kT}\right)$$

tutaj: μ – moment magnetyczny mionu, $k \approx 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K (stała Boltzmanna), B – indukcja pola magnetycznego, T – temperatura.
Zauważmy, że dla B = 2.5 T, T = 0.5 K otrzymuje się P_e = 0.998 ale P_p = 0.005 !

- Specjalna metoda polaryzacji nukleonów: Dynamical Nuclear Polarisation.

p e



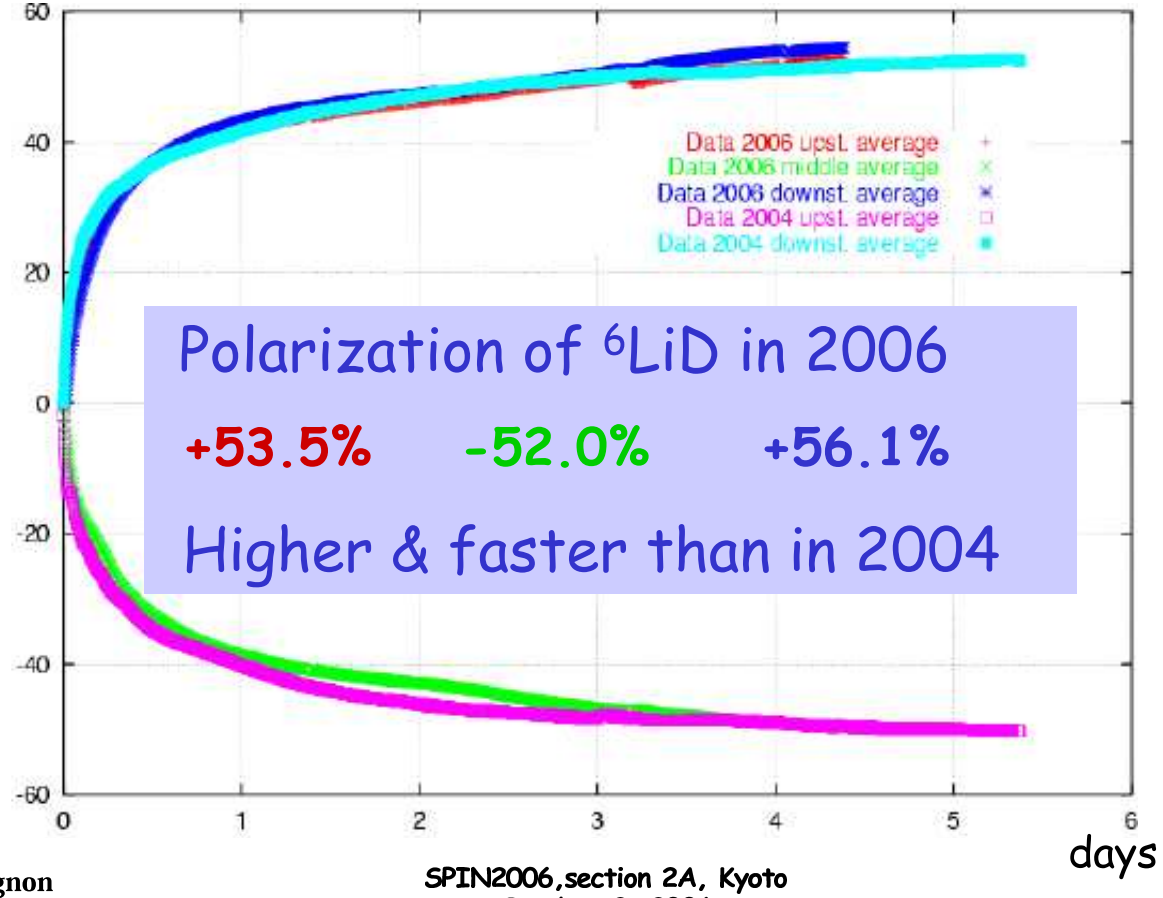
$\omega = \frac{\mu B}{\hbar}$

$\frac{\omega_e}{2\pi} = 70$ GHz

$\frac{\omega_p}{2\pi} = 106$ MHz

Budowanie polaryzacji tarczy w COMPASS-ie (***)

Polarized target performances



Polarization of ^{6}LiD in 2006

+53.5% **-52.0%** **+56.1%**

Higher & faster than in 2004

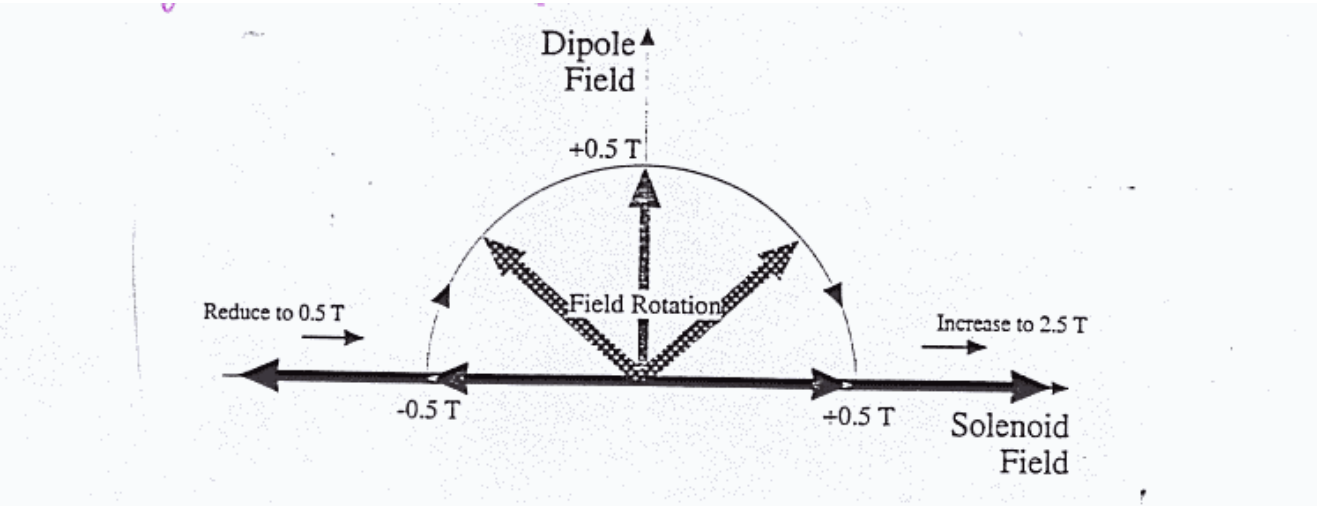
A.Magnon

SPIN2006,section 2A, Kyoto
October 2, 2006

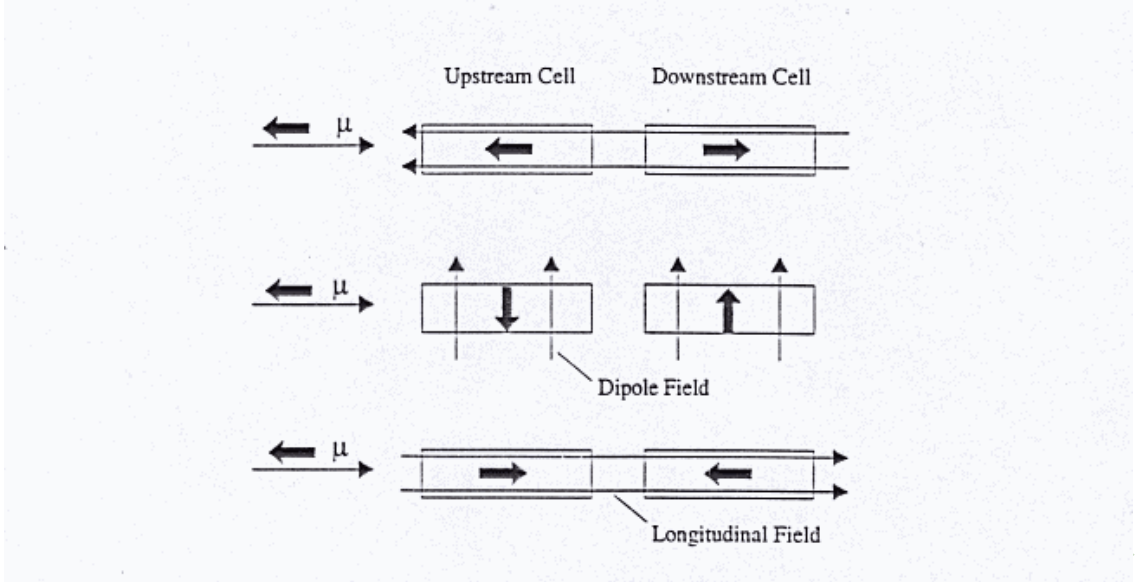
25

Odwracanie polaryzacji tarczy w COMPASS-ie (***)

- Co kilka godzin $\longrightarrow$ zmniejszenie błędów systematycznych. Praktycznie zerowe straty polaryzacji przy odwracaniu !



- Mierzymy więc ten sam stan końcowy dla różnych konfiguracji stanu początkowego:



Zagadka spinu nukleonu

Jakie są dotychczasowe wyniki pomiarów (COMPASS, HERMES,...)?

- $\Delta\Sigma \approx 0.3$
- Δ G$\approx$0 !
- Powraca więc pytanie: co buduje spin nukleonu ?
  Orbitalne momenty pędu ???

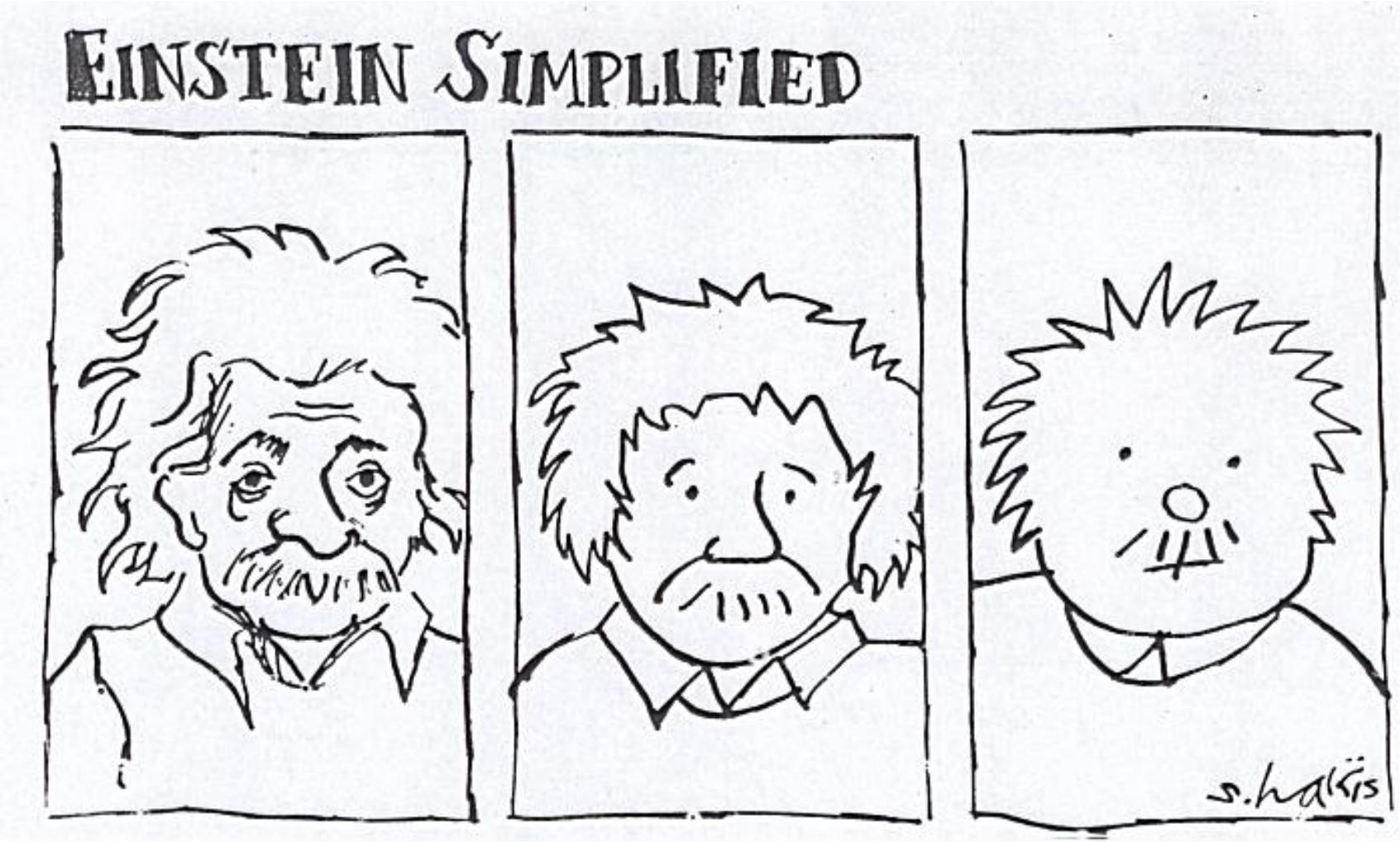
Outline

1. Wprowadzenie
2. Supersymetria
3. Doświadczenie Sterna–Gerlacha
4. Anomalny moment magnetyczny elektronu i mionu
5. Doświadczenie „$g_\mu - 2$" w BNL
6. Zagadka spinu protonu – współpraca COMPASS w CERN
7. Podsumowanie

Podsumowanie

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta G + \Delta L$$

Czy zbliżamy się do rozwiązania „zagadki spinu nukleonu”?

- ΔG musi być zmierzone bardzo precyzyjnie! COMPASS !
- Konieczny też niezależny pomiar ΔL
  (plany: COMPASS, HERMES i JLAB).
- Przyroda zamiast odpowiedzi stawia nowe pytania
  i jedyne, co zaczynamy dobrze rozumieć to to, że spin jest BARDZO skomplikowany...

Proszę wybaczyć uproszczenia...