

Grzegorz Wrochna

Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana

wrochna@fuw.edu.pl

<http://cmsdoc.cern.ch/~wrochna>

Detekcja cząstek elementarnych

- Jak zobaczyć pojedynczą cząstkę?
- Jak rozpoznać co to za cząstka?
- Jak zmierzyć jej pęd, energię, masę itp?
- Jak dostrzec cząstkę żyjącą $<10^{-20}$ s?
- Jak zmierzyć czas życia $>10^{30}$ lat?
- Jak zmierzyć strumień neutrin przelatujących przez Ziemię bez żadnego oddziaływania?
- Jak obserwować kwarki i gluony, które nie mogą istnieć samodzielnie?
- Jak odkryć nową cząstkę?

Literatura:

- <http://info.fuw.edu.pl/HEP/cms/edu/>
- DELTA 5/2000
- Fizyka w szkole 3,4/1999 i 1/2000

Detekcja cząstek

Pod pojęciem detekcji rozumiemy:

- zaobserwowanie cząstki
- rejestracja obserwacji
- pomiar prędkości, pędu, energii, itp.
- identyfikacja

Podstawowe zjawiska

Cząstka naładowana przechodząc przez materię manifestuje swoją obecność poprzez

- jonizację ośrodka
- emisję fotonów

Jonizacja

polega na wybijaniu elektronów z atomów ośrodka.

W półprzewodnikach przechodząca cząstka może tworzyć pary elektron-dziura.

Emisja fotonów

- **Scyntylacja** —
cząstka przechodząca przez niektóre substancje (NaI) pobudza atomy, które następnie emitują światło (fotony).
- **Promieniowanie Czerenkowa** —
cząstka poruszająca się w ośrodku szybciej niż światło wysyła fotony w stożku przypominającym falę uderzeniową naddźwiękowego samolotu.
- **Promieniowanie przejścia** —
emitowane przez cząstkę na granicy dwóch ośrodków
- **Promieniowanie hamowania** —
emitowane przez cząstkę zwalniającą w ośrodku.

Detektory wizualne

Emulsja fotograficzna

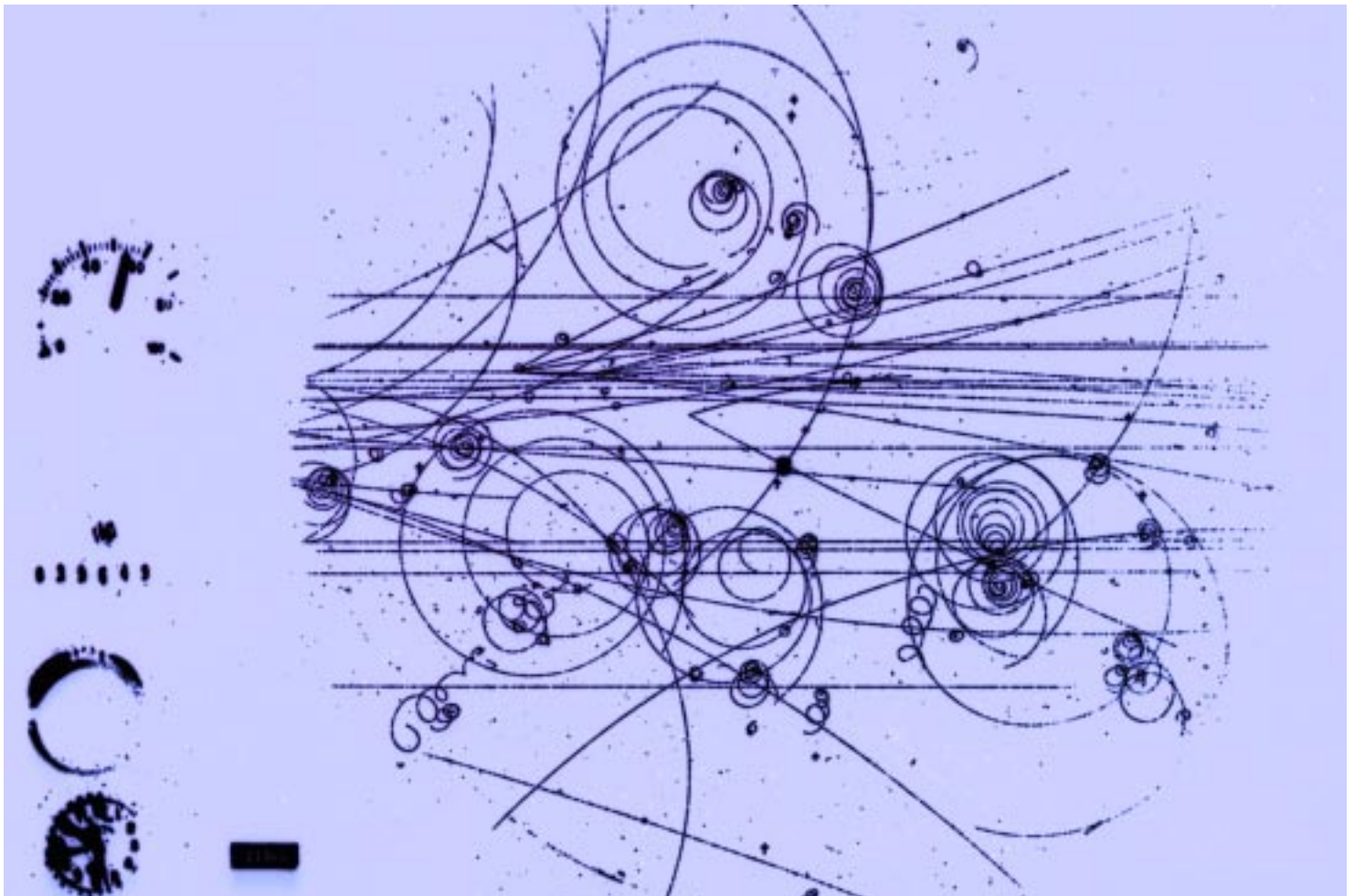
jonizacja powoduje zaciemnienie emulsji wzdłuż toru cząstki

Komora mgłowa (Wilsona)

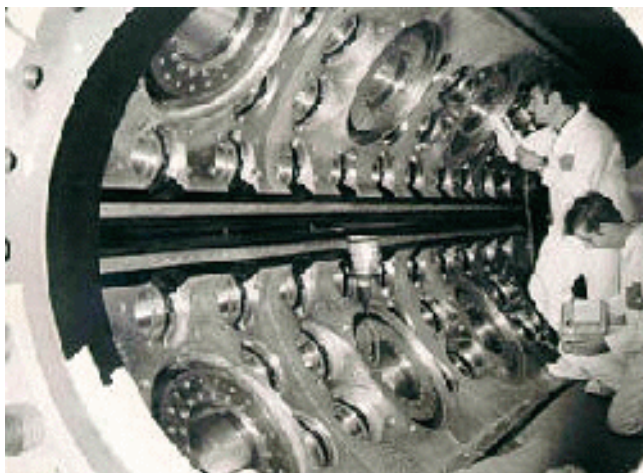
w przechłodzonym gazie na zjonizowanych centrach kondensują się krople tworzące obraz toru cząstki, który może być np. sfotografowany.

Komora pęcherzykowa

w przegrzanej cieczy (np. ciekły wodór) na zjonizowanych centrach tworzą się pęcherzyki gazu tworzące obraz toru cząstki, który może być np. sfotografowany.

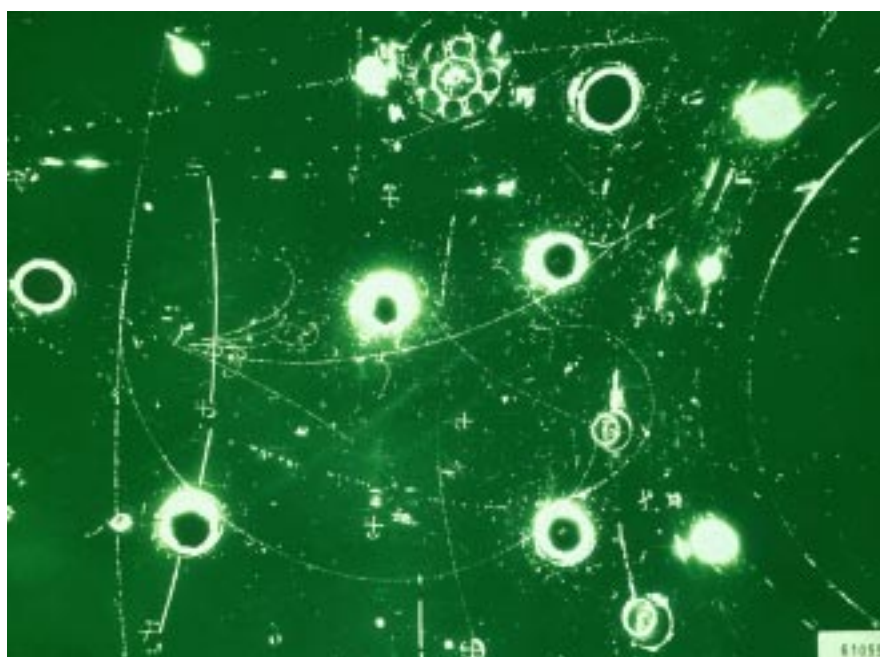


Komora pęcherzykowa



GARGAMELLE

CERN photos 1970



“Komora pęcherzykowa” w kuchni

W kuchence mikrofalowej ogrzewamy wodę w szklanym dzbanku. Gdy zaczną pojawiać się pierwsze duże bąble pary, dzbanek wyjmujemy z kuchenki. Do dzbanka szybko wrzucamy torebkę herbaty ekspresowej. Nagle woda zaczyna gwałtownie wrzeć.

Uwaga! Gwałtownie wrząca woda wylewa się z dzbanka i może nas poparzyć!

W kuchence mikrofalowej woda ogrzewana jest równomiernie w całej objętości (w przeciwieństwie do np. czajnika na palniku gazowym) i wrzenie “nie ma od czego się zacząć”.

Temperatura wody przekracza 100°C.

Jest to tzw. **ciecz przegrzana**.

Torebka herbaty spełnia rolę “cząstki elementarnej”.

Nierówności jej powierzchni stają się centrami, wokół których rozpoczyna się wrzenie przegrzanej cieczy.

Detektory gazowe

Cząstka jonizuje gaz między dwoma elektrodami o wysokim napięciu. Następuje wyładowanie dające rejestrowalny impuls elektryczny.

Najczęściej spotykane:

Licznik Geigera-Müllera

Historycznie pierwszy detektor elektroniczny.

Katodą jest rurka metalowa, anodą — drut w jej środku, podłączony do wzmacniacza i głośnika.

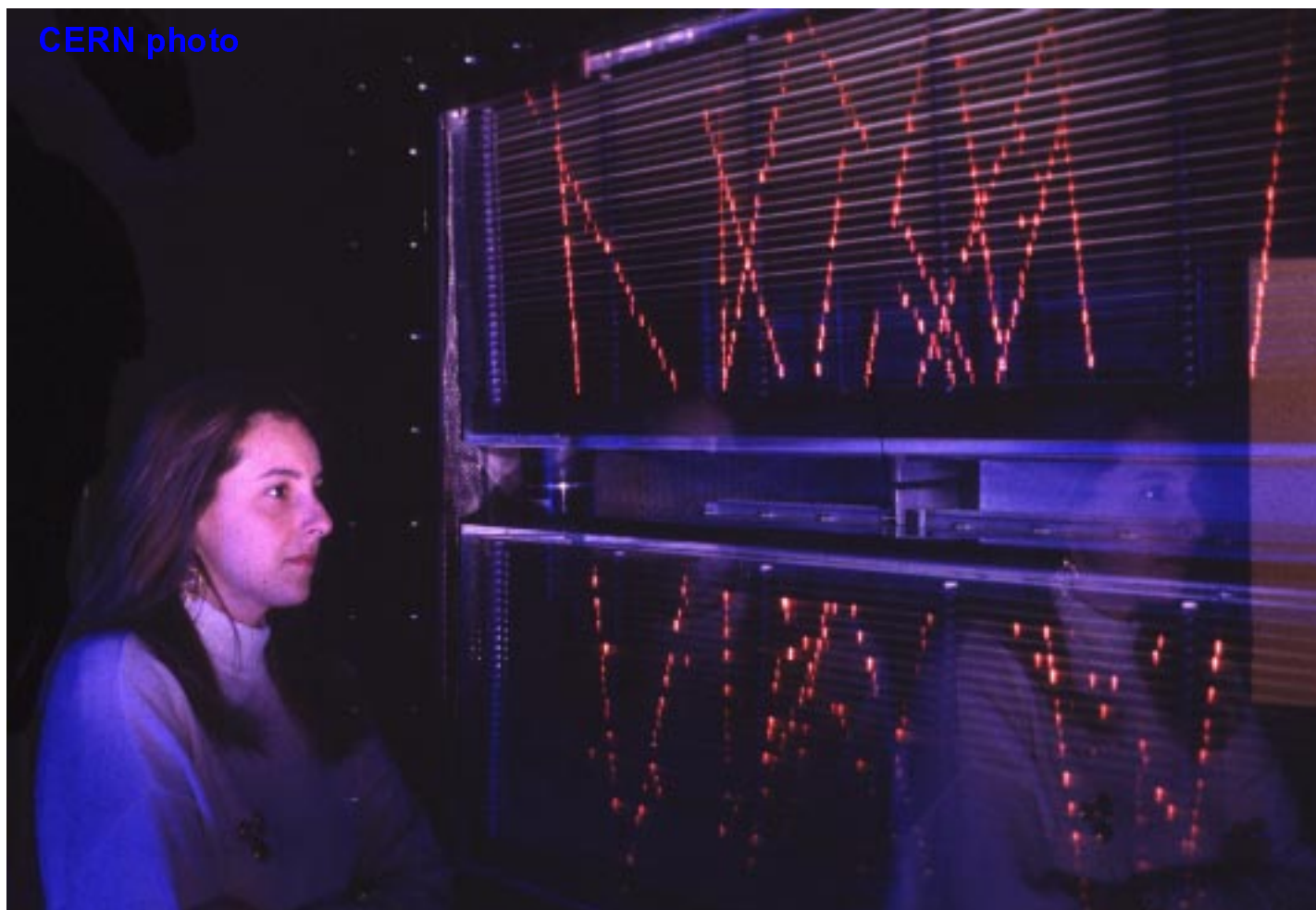
Przejście cząstki powoduje słyszalny w głośniku trzask.

Komory drutowe

wykorzystują silne pole elektryczne wokół drutu.

- **Komora wielodrutowa** —
położenie cząstki określone jest przez numer drutu dającego sygnał (1-2mm).
- **Komora dryfowa** —
położenie cząstki określone jest przez czas dryfu elektronów jonizacji ($\sim 50\mu\text{m/ns}$) do najbliższego drutu (100-200 μm).
- **Komora z odczytem katodowym** —
położenie cząstki określone jest przez stosunek ładunku indukowanego na różnych elementach katody (50-100 μm).
- **Komora proporcjonalna** —
wielkość sygnału jest proporcjonalna do liczby zarejestrowanych cząstek. Wykorzystywana m. in. do pomiaru energii kiedy cząstka pierwotna produkuje dużą liczbę cząstek wtórnych.

Detektory gazowe



Wyładowania w gazie wzdłuż torów mionów kosmicznych.



Nobel dla Charpaka



Do lat 60-tych cząstki elementarne badano głównie rejestrując ich oddziaływania w emulsjach i na kliszach fotograficznych. Analiza takiego zdjęcia wymagała ręcznego pomiaru współrzędnych wielu punktów na torze każdej cząstki. Gigantycznym nakładem pracy można było przeanalizować ~10 000 zdjęć z trwającego kilka lat eksperymentu.

Przełomowym momentem było wynalezienie w 1968 r. komory wielodrutowej.

Detektor ten pozwolił na całkowicie automatyczną, elektroniczną rejestrację oddziaływań cząstek.

Pozwoliło to na pełną, komputerową ich analizę, co dało możliwość przebadania milionów interesujących przypadków z jednego eksperymentu.

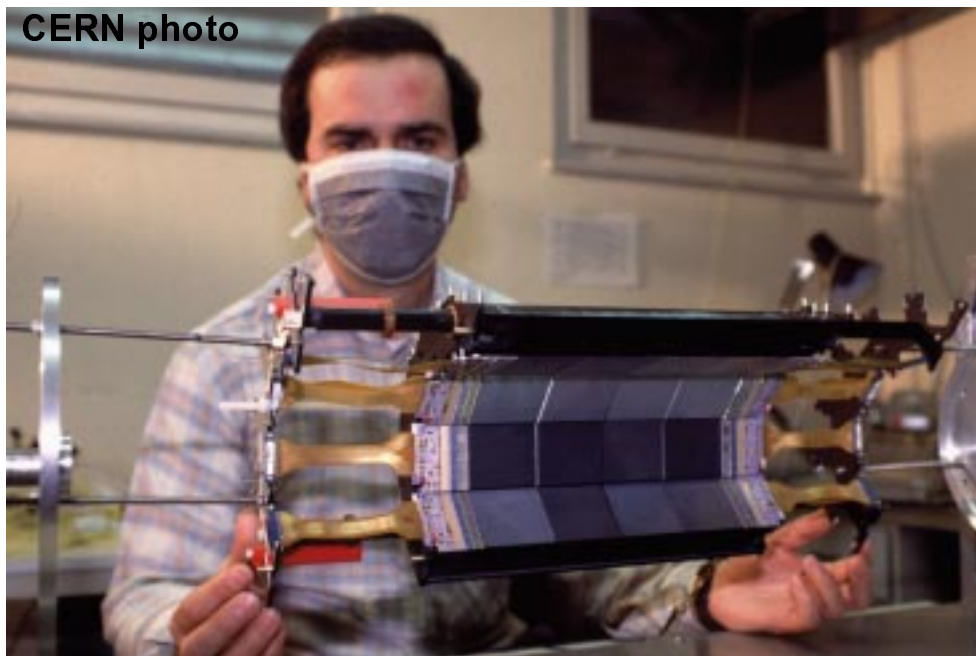
Georges Charpak, Polak z pochodzenia, ur. w 1924 r. w Dąbrowicy. Ukończył studia na College de France w Paryżu. Od 1959r pracuje w CERNie. W 1992 r. został uhonorowany nagrodą Nobla za prace nad detektorami cząstek elementarnych, a w szczególności za wynalezienie komory wielodrutowej.

Detektory półprzewodnikowe

Cząstka przechodząca przez półprzewodnik tworzy pary elektron-dziura. Powoduje to przepływ rejestrowalnego prądu.

Detektory mikropaskowe

Położenie cząstki określone jest przez elektrodę odczytową w kształcie paska o szerokości rzędu $100\mu\text{m}$ i długości rzędu 10cm.



Detektory mozaikowe (pixel detectors)

Położenie cząstki określone jest przez elektrodę odczytową w kształcie prostokąta o bokach rzędu $10\mu\text{m}$.

Detektory optyczne

Detektor optyczny składa się z przezroczystego ośrodka i elementu światłoczułego. W ośrodku, przechodząca cząstka powoduje scyntylację, emisję promieniowania Czerenkowa lub promieniowania przejścia.

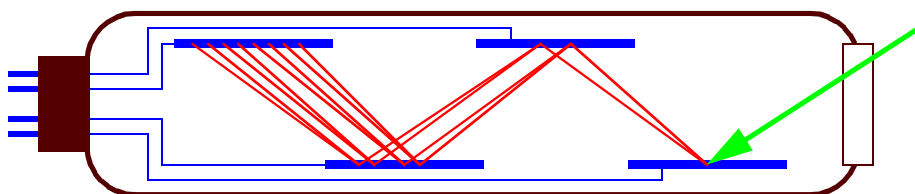
Detektor neutron Super-Kamiokande wykorzystuje zbiornik z 50 000 ton wody jako ośrodek promieniowania Czerenkowa.

Detektor promieniowania kosmicznego Amanda jako scyntylator wykorzystuje lód na Antarktydzie.

Elementem światłoczułym jest zwykle fotopowielacz lub fotodioda.

Fotopowielacz

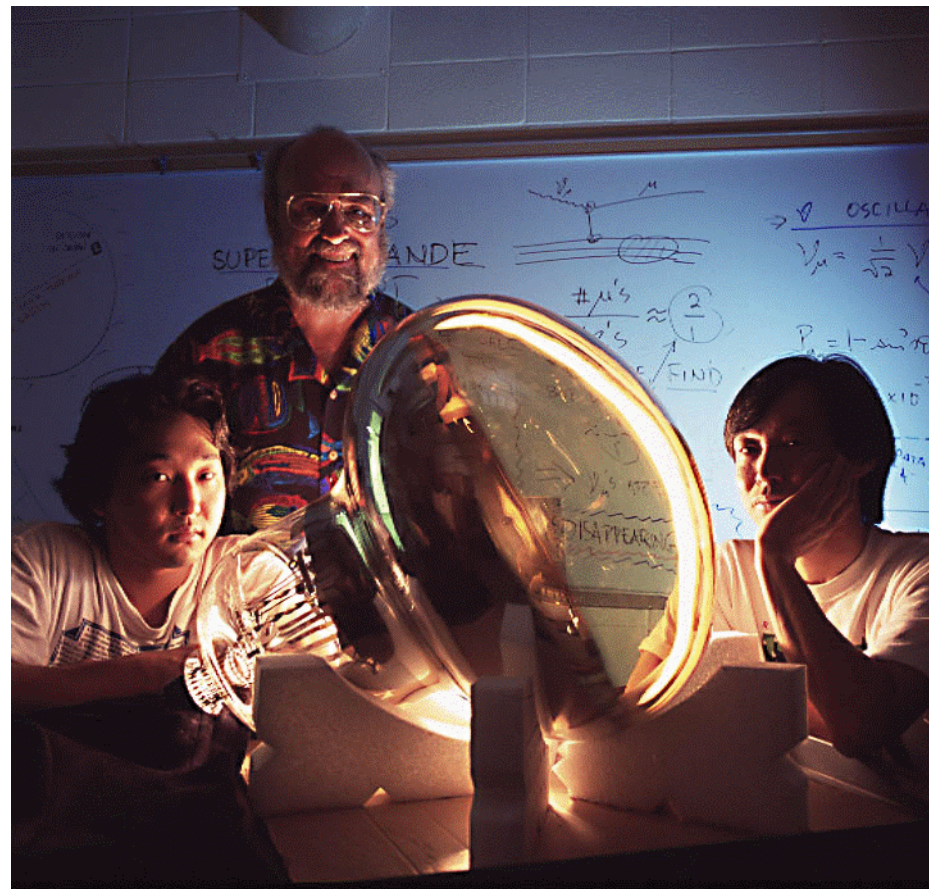
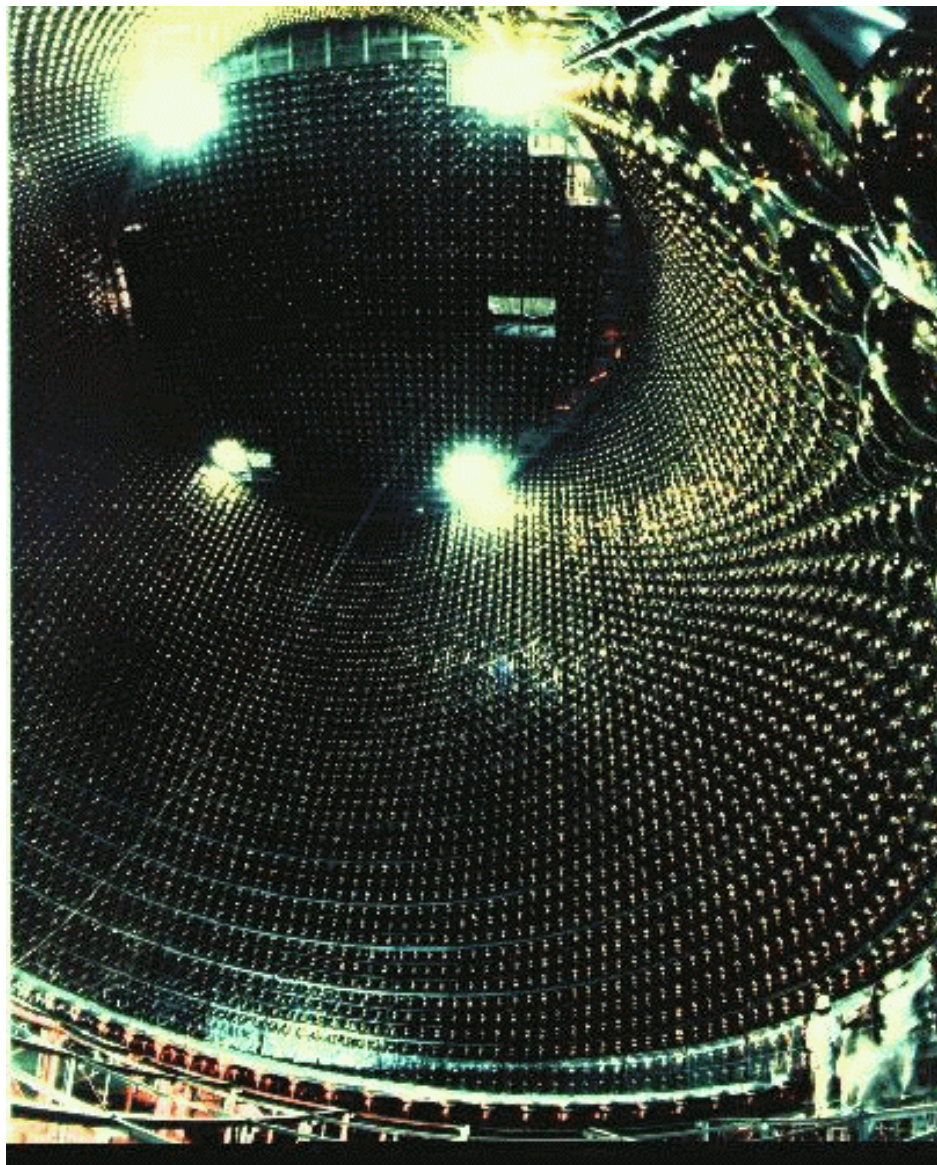
Zespół specjalnie ukształtowanych elektrod umieszczonych w bańce próżniowej. Padający foton wybija z pierwszej elektrody elektron, który po przyspieszeniu w polu elektrycznym wybija kilka elektronów z drugiej elektrody. Każdy z wybitych elektronów jest znowu przyspieszany i wybija kilka nowych elektronów z następnej elektrody. Proces “powielania elektronów” jest kontynuowany aż do uzyskania mierzalnego prądu na ostatniej elektrodzie.



Fotodioda

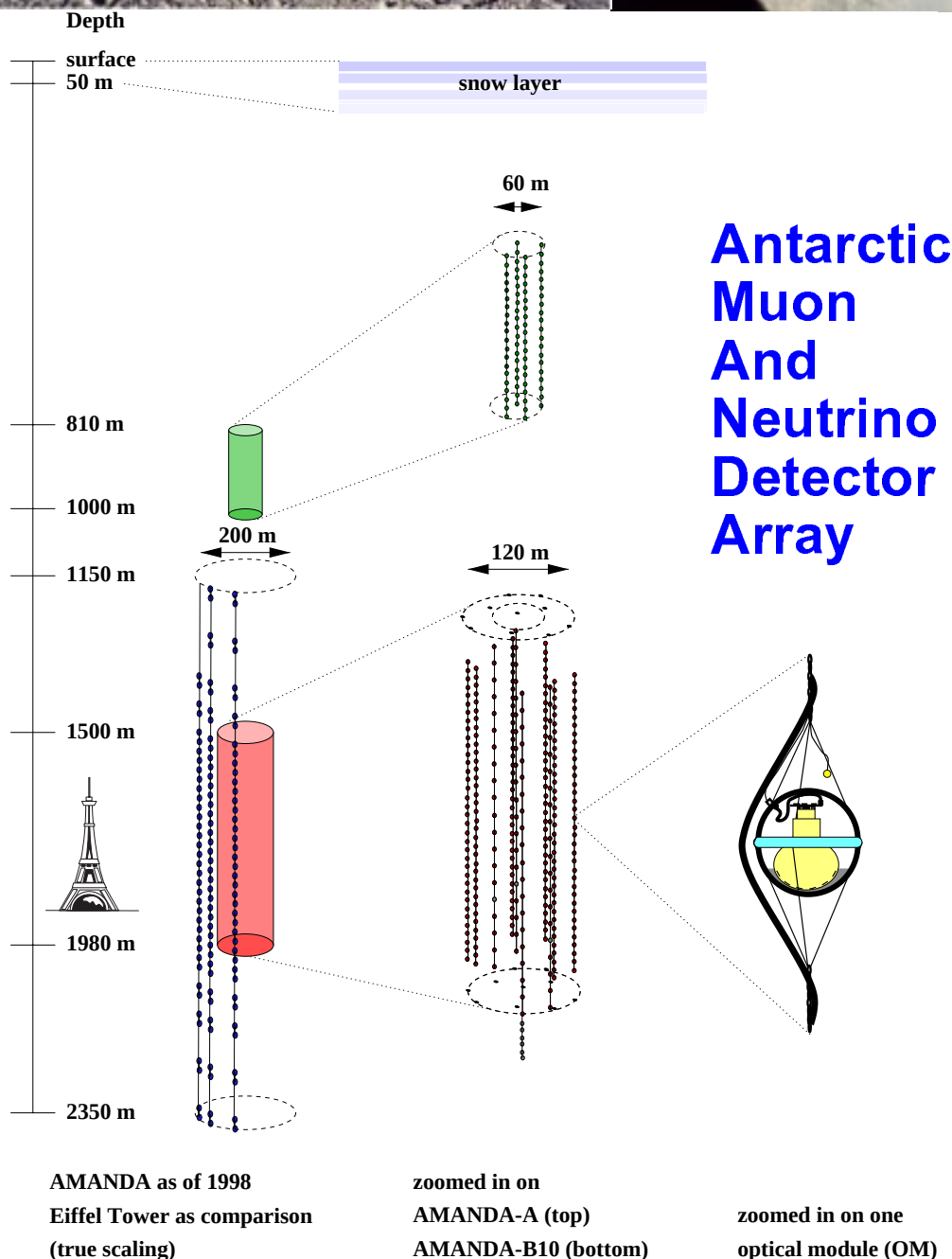
to urządzenie półprzewodnikowe. Padający foton wytwarza nośniki (elektrony i dziury) umożliwiające przepływ prądu w kierunku zaporowym.

Super Kamiokande



Fotopowielacze rejestrują
promieniowanie Czerenkowa
cząstek poruszających się w wodzie

AMANDA



Cząstki długożyciowe

cząstka		czas życia τ	$c \cdot \tau$
foton	γ	∞	∞
elektron	e^-	∞	∞
neutrino	ν	∞	∞
proton	p^+	$>1.6 \cdot 10^{33}$ lat	∞
neutron	n	887 s	$2.7 \cdot 10^8$ km
mion	μ^-	$2.2 \cdot 10^{-6}$ s	659 m
pion	π^+	$2.6 \cdot 10^{-8}$ s	7.8 m
kaon	K^+	$1.2 \cdot 10^{-8}$ s	3.7 m
kaon	K_L^0	$5.2 \cdot 10^{-8}$ s	15.5 m
kaon	K_S^0	$0.9 \cdot 10^{-10}$ s	2.7 cm
$\Lambda^0 \Sigma^+ \Xi^{0-} \Omega^- \dots$		$\sim 10^{-10}$ s	~ 3 cm
$D^{0+} B^{0+} \Lambda_c^+ \Lambda_b^0$		$\sim 10^{-12}$ s	~ 300 μ m
pion	π^0	$8.4 \cdot 10^{-17}$ s	25 nm
$\eta, \psi, \text{ rezonanse}$		$<10^{-19}$ s	—

W praktyce bezpośredniej detekcji podlegają jedynie

$\gamma, e^\pm, p^\pm, n, \mu^\pm, \pi^\pm, K^\pm, K_L^0$.

Inne cząstki badamy obserwując produkty ich rozpadu.

Cząstki długożyciowe

Pomiar prędkości

Możliwy tylko dla cząstek o niezbyt dużej energii poruszających się z prędkością istotnie mniejszą od c .

- czas przelotu między dwoma licznikami $\Delta t = d/v$
- kąt stożka promieniowania Czerenkowa $\sin \theta = v_c/v$

Pomiar pędu

Promień krzywizny toru w polu magnetycznym

$$R = p / 0.3 B \quad [R]=m, [p]=\text{GeV}, [B]=T$$

Tor może być

- zaobserwowany bezpośrednio w emulsji fotograficznej, komorze mgłowej lub pęcherzykowej.
- wyznaczony przez szereg punktów zmierzonych
 - detektorem mikropaskowym lub mozaikowym
 - komorą drutową

Pomiar energii

Elektron i foton “grzęzną” w materii wywołując krótką kaskadę elektromagnetyczną.

Hadrony (p , n , π , K) wywołują kaskadę hadronową.

Liczba cząstek w kaskadzie jest proporcjonalna do energii cząstki pierwotnej.

Do jej zmierzenia może służyć

- scyntylator z fotopowielaczem lub fotodiodą
- komora proporcjonalna

Zespół takich detektorów mierzący energię nazywamy **kalorymetrem**.

Identyfikacja cząstek

Cząstki długożyciowe identyfikujemy obserwując jak oddziałują z materią:

- cząstka naładowana — ślad
- elektron, foton — kaskada elektromagnetyczna
- hadron (p, n, π , K) — kaskada hadronowa

Detektor uniwersalny składa się więc zwykle z 4 części:

- wewnętrzny detektor śladowy (“traker”)
- kalorymetr elektromagnetyczny
- kalorymetr hadronowy
- zewnętrzny detektor śladowy (det. mionowy)

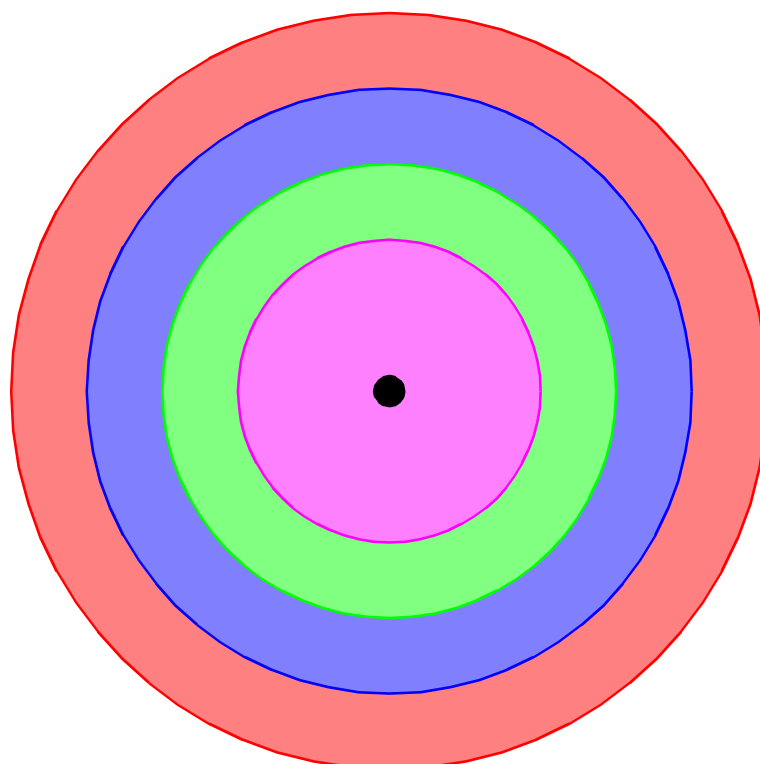
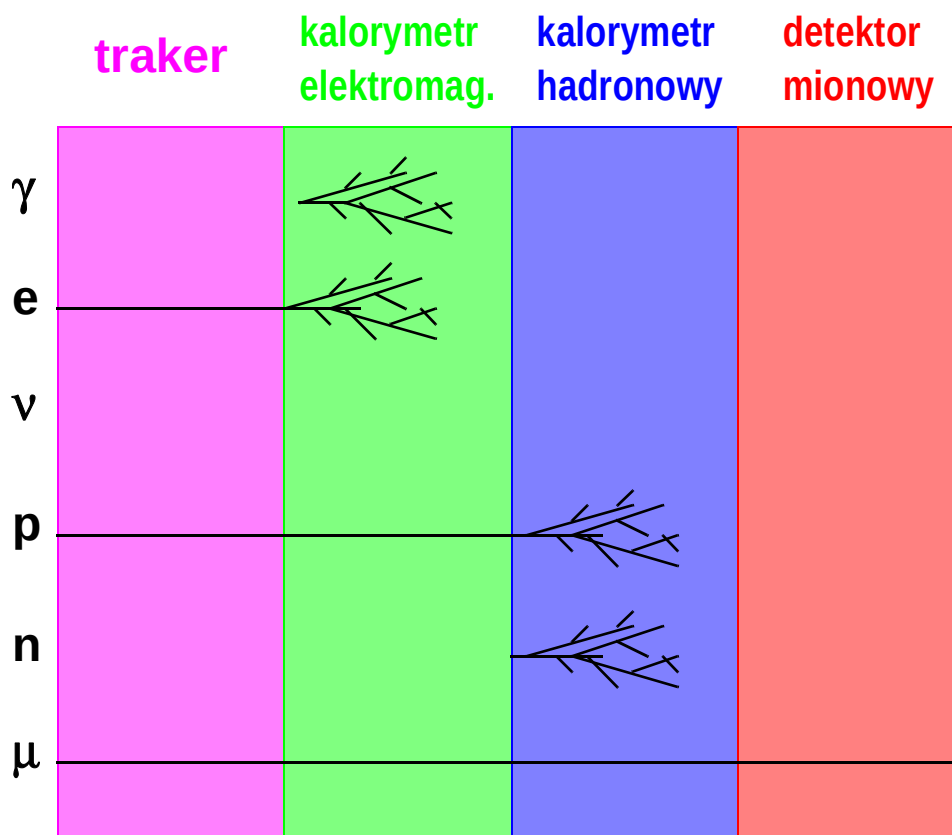
	γ	e	ν	p, π ,K	n	μ
traker	—	+	—	+	—	+
kalorymetr elektromag.	+	+	—	—	—	—
kalorymetr hadronowy	—	—	—	+	+	—
detektor mionowy	—	—	—	—	—	+

Obecność neutrina można rozpoznać jedynie po “brakującej energii” — pozornym złamaniu zasady zachowania.

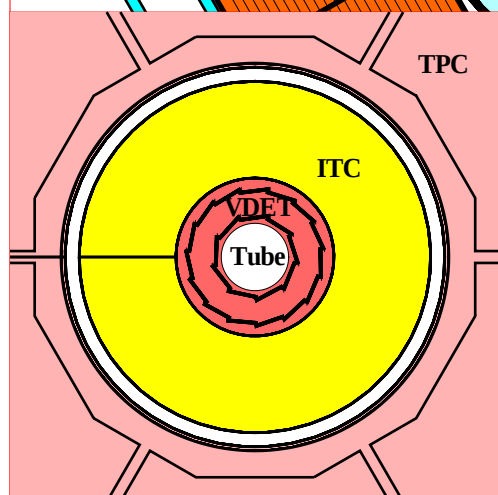
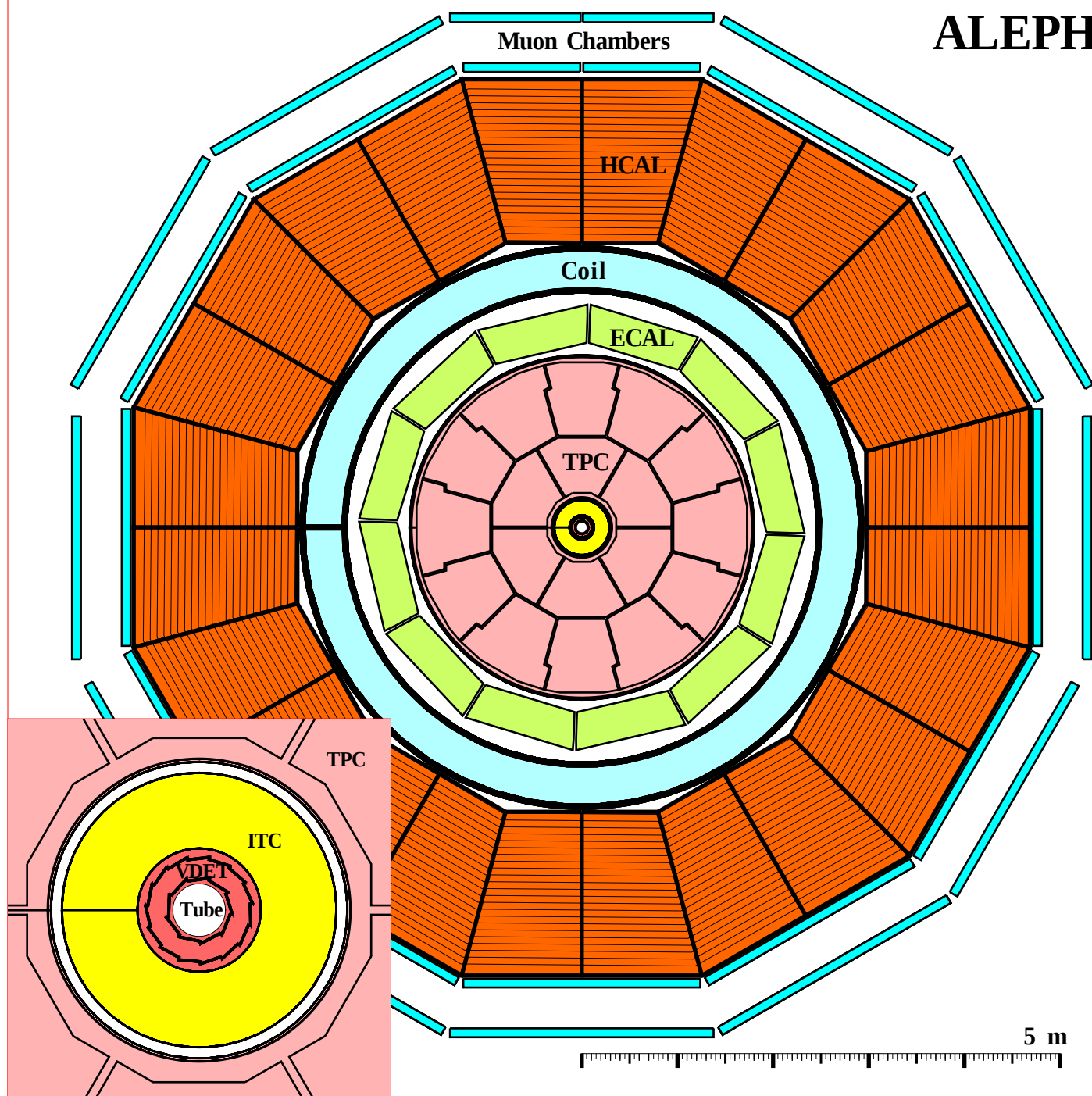
Proton, kaon i pion można odróżnić wyznaczając masę cząstki, zmierzwszy uprzednio jej energię i pęd:

$$m^2 = E^2/c^4 - p^2/c^2$$

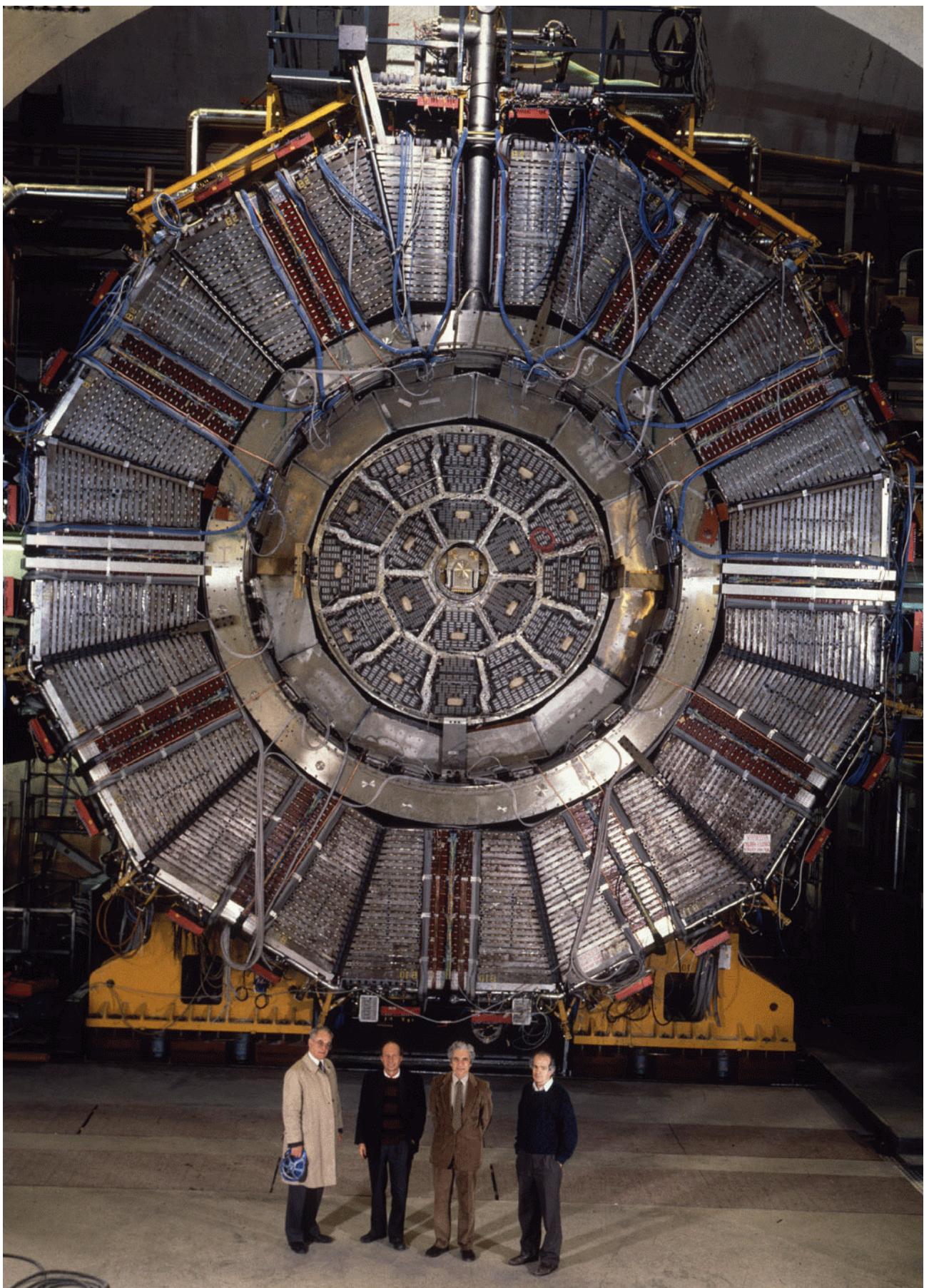
Identyfikacja cząstek



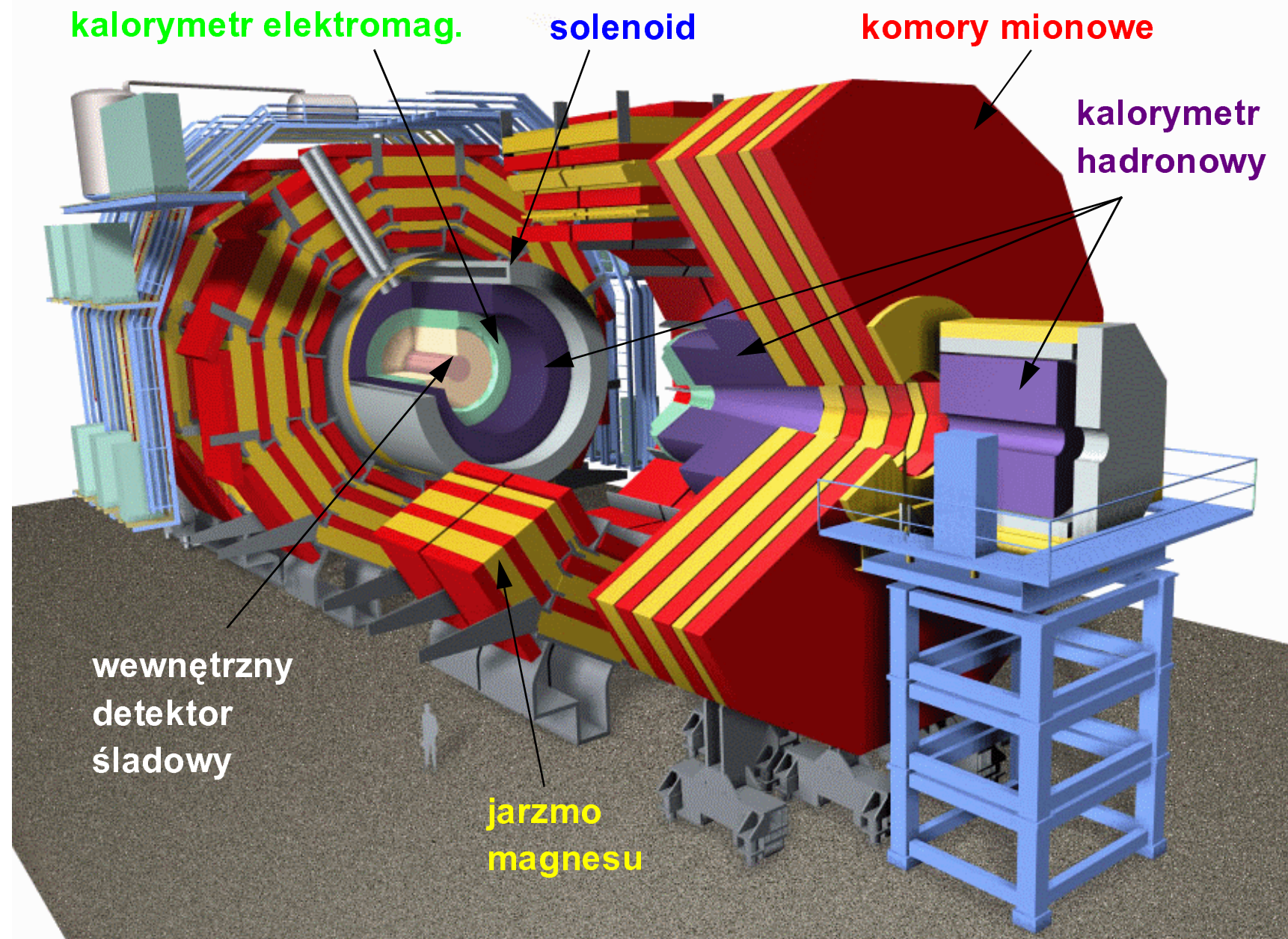
ALEPH



ALEPH



Compact Muon Solenoid



Budowa detektora CMS

**SUPERCONDUCTING
COIL**

ECAL Scintillating PbWO_4
Crystals

CALORIMETERS

HCAL Plastic scintillator
copper
sandwich

IRON YOKE

TRACKER

Micro Strip Gas Chambers (MSGC)
Silicon Microstrips
Pixels

MUON BARREL

Drift Tube
Chambers (DT)

Resistive Plate
Chambers (RPC)

MUON ENDCAPS

Cathode Strip Chambers (CSC)
Resistive Plate Chambers (RPC)

Waga 12 500 ton
Średnica 15 m
Długość 22 m
Pole magn. 4 Tesle

Cząstki krótkożyciowe

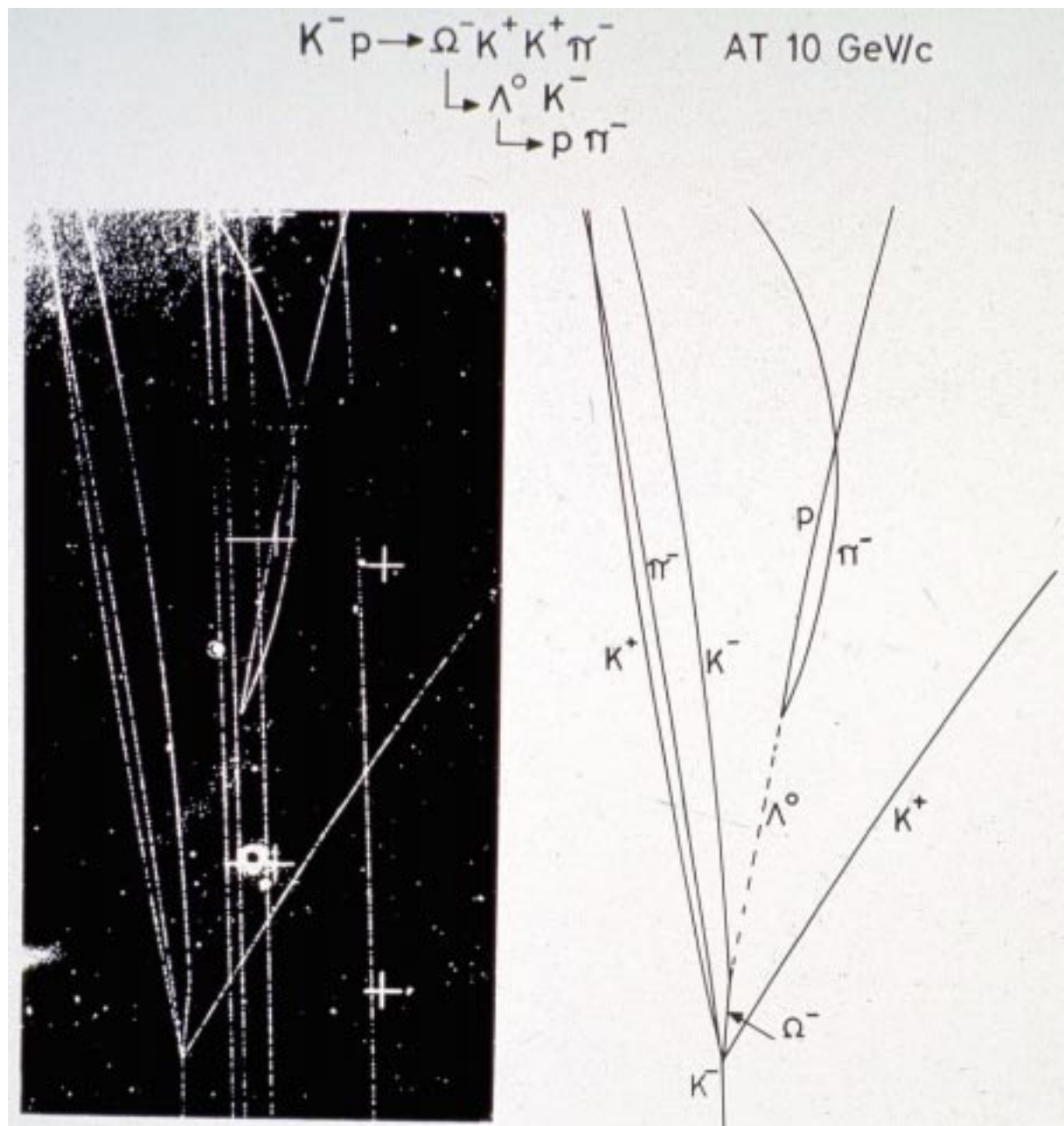
Cząstki krótkożyciowe badamy obserwując produkty ich rozpadu. Jeżeli znamy energie i pędy cząstek wtórnych to z zasad zachowania możemy wyliczyć energię, pęd i masę cząstki pierwotnej.

Jest to standardowa metoda odkrywania nowych cząstek:

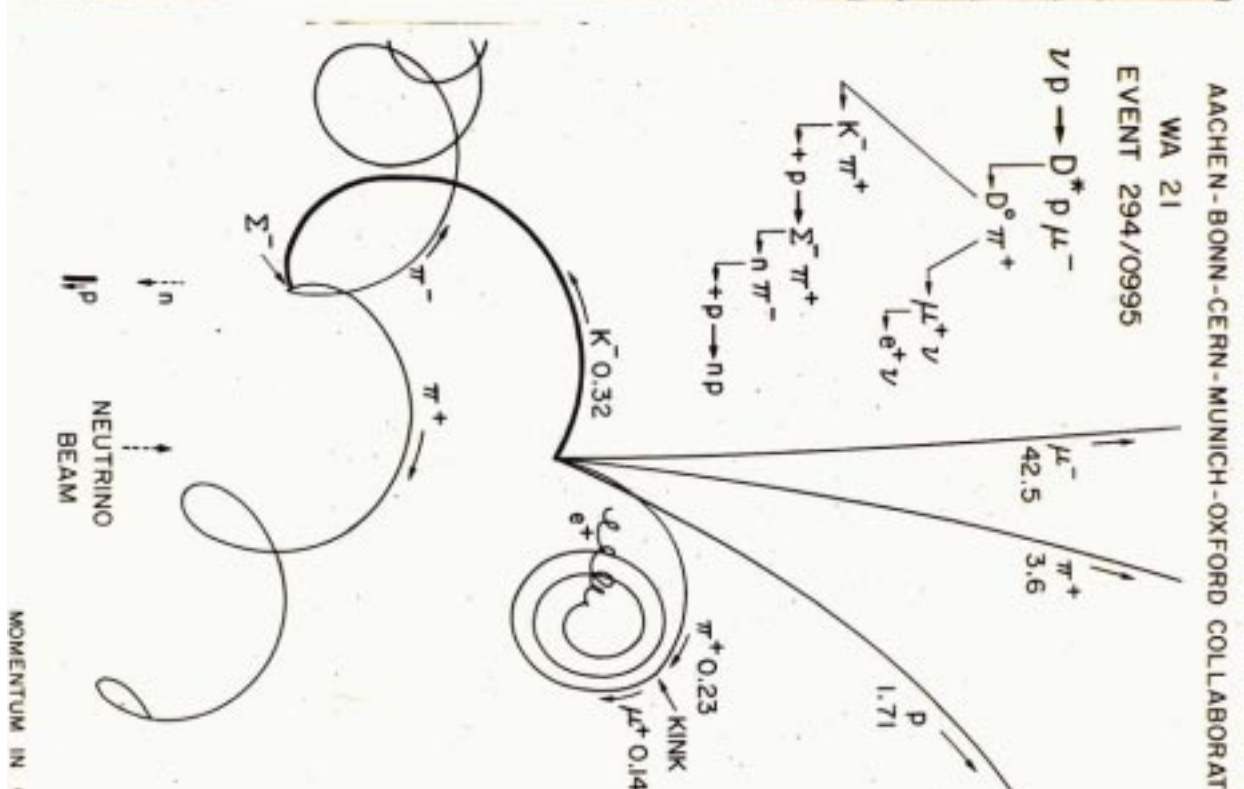
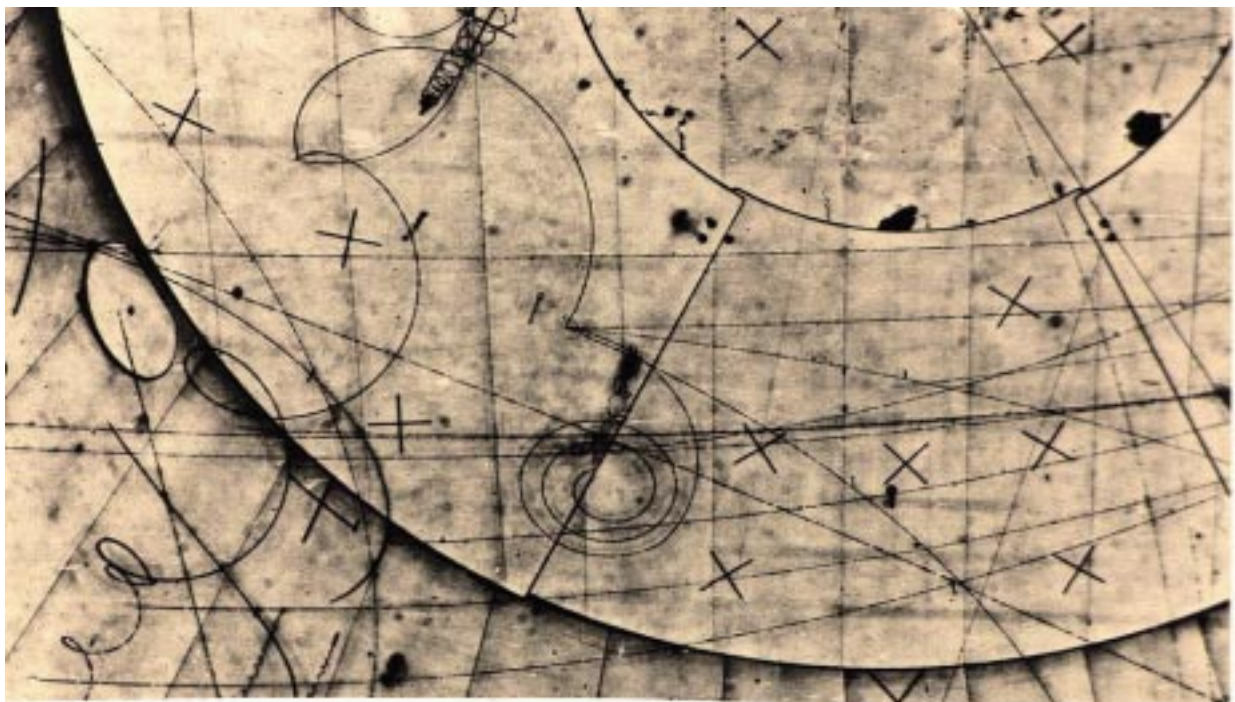
1. Zastanawiamy się na jakie cząstki mogłaby się ona rozpadać.
2. Dla każdego przypadku, w którym takie cząstki pojawiły się wyliczamy masę hipotetycznej cząstki pierwotnej i zaznaczamy ją na wykresie.

Jeżeli rzeczywiście była ona wytworzona w części obserwowanych przypadków, to na tle przypadkowych kombinacji dających rozmaite masy pojawi się “pik” w miejscu masy poszukiwanej cząstki.

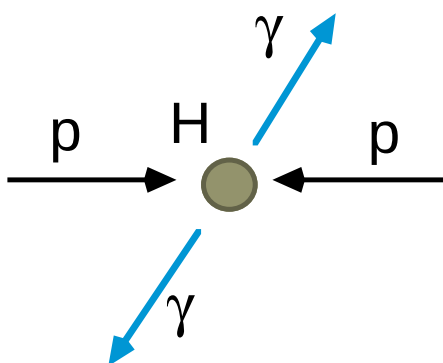
Rekonstrukcja zdarzenia



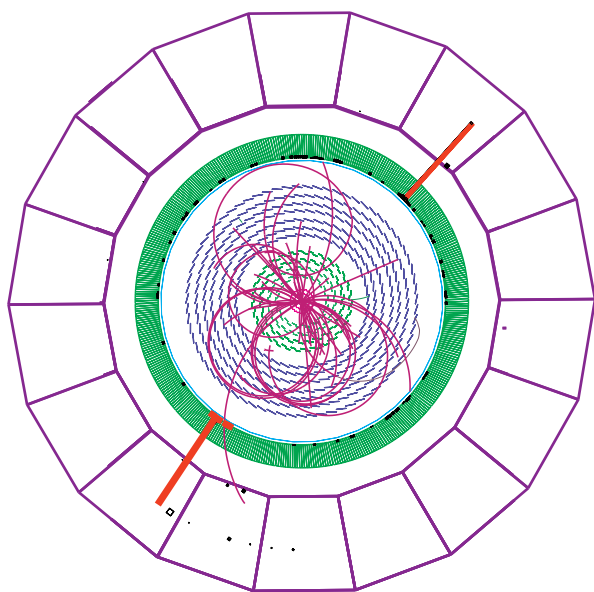
Rekonstrukcja zdarzenia



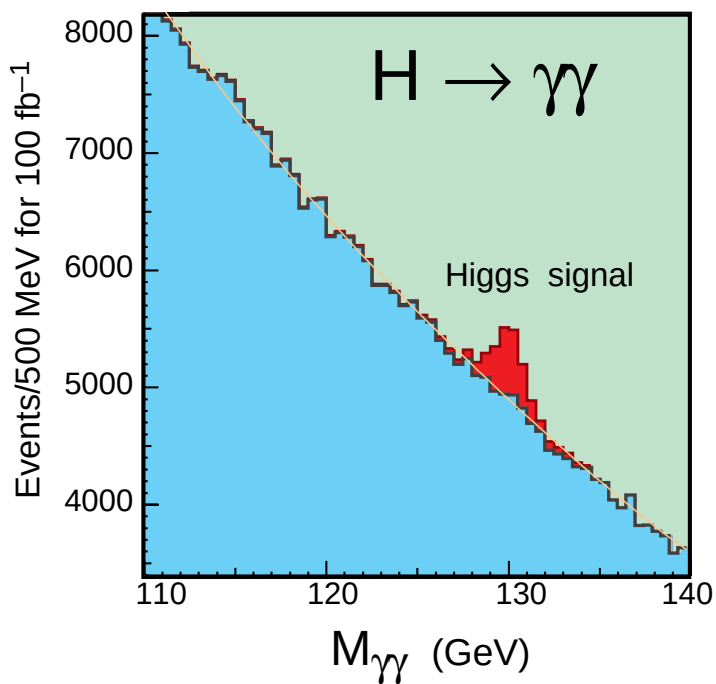
$$H \rightarrow \gamma\gamma \quad (80 < M_H < 140 \text{ GeV})$$



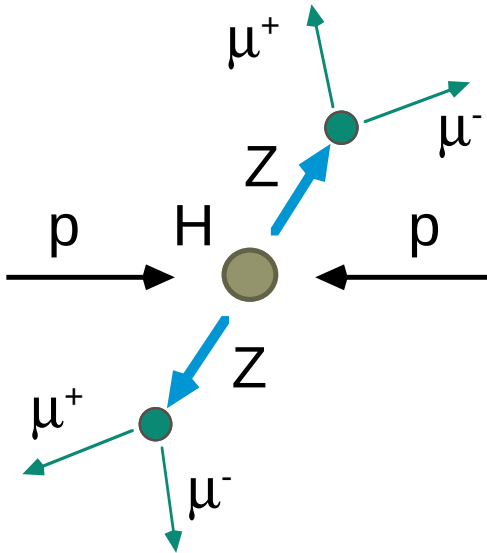
Precyzyjny pomiar energii i kierunku fotonów pozwala zrekonstruować masę $M_H \sim 100 \text{ GeV}$ z dokładnością do 1% i wydobyć sygnał spod olbrzymiego tła.



$M_{\text{Higgs}} = 100 \text{ GeV}$



$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4 \text{ leptony} \quad (130 < M_H < 500 \text{ GeV})$

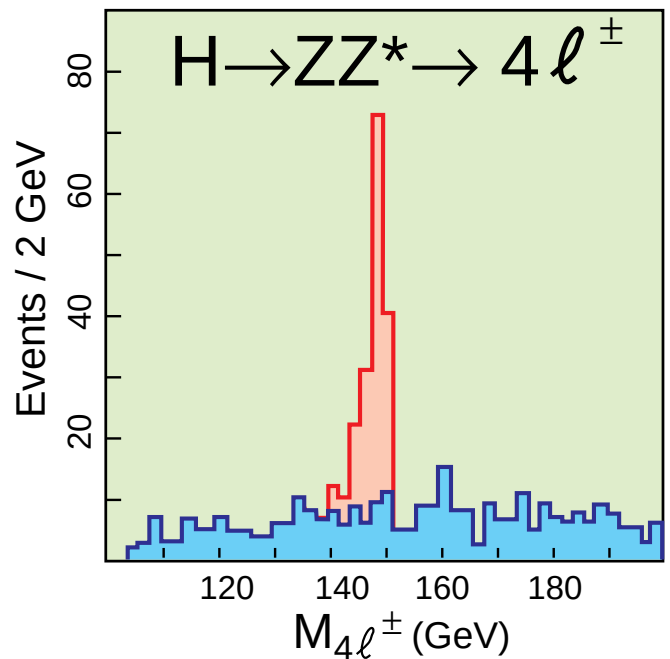
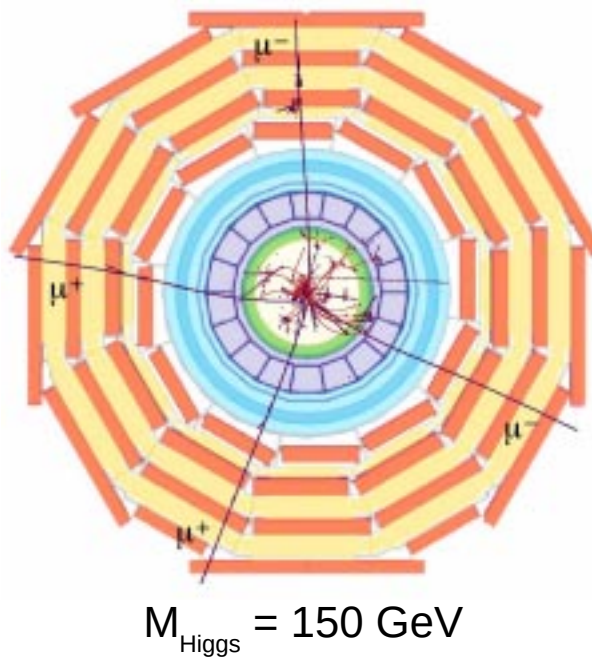


Przypadku z czterema wysoko-energetycznymi leptonami (e lub μ) nie da się nie zauważyć.

Zwłaszcza pewna identyfikacja mionów ("złoty kanał") pozwala niemal całkowicie wyeliminować tło.

Precyzja:

$$\sigma (M_H \sim 170 \text{ GeV}) = 1 \text{ GeV}.$$



Detekcja neutrin

Prawdopodobieństwo oddziaływania neutrina z materią jest tak małe, że neutrino może przelecieć przez Ziemię “nie zauważywszy” jej.

Nie ma więc szans na bezpośrednie zaobserwowanie pojedynczego neutrina. Jego obecność możemy jednak rozpoznać po “brakującej energii”.

Jeżeli strumień neutrin jest bardzo silny, a detektor dostatecznie duży, to niektóre z nich oddziałają, np. zmieniając neutron w proton+elektron, lub wybijając elektron z atomu.

Detektory takie jak IMB czy Kamiokande obserwują neutrina wyprodukowane w atmosferze przez promieniowanie kosmiczne, mierzą strumień neutrin słonecznych, a nawet w 1987 zarejestrowały neutrina z wybuchu supernowej odległej o 170 000 lat świetlnych!

(Delta 2/1999)

Rozpad protonu

Czy proton jest rzeczywiście cząstką trwałą?

Jest obiektem złożonym, czemu więc nie miałby się rozpaść?

Rzeczywiście, pierwsze teorie unifikacji oddziaływań przewidywały rozpad po czasie rzędu ... **10^{29} lat!**

Dla porównania wiek Wszechświata $\sim 10^{10}$ lat.

Czy to ma sens?

TAK! Potrafimy nawet taki czas zmierzyć!

Detektor Super-Kamiokande zawiera 50 000 ton wody, czyli $\sim 10^{34}$ protonów. Średnio powinien więc obserwować 100 000 rozpadów rocznie. Przez rok nie zaobserwowano żadnego. Czas życia protonu jest zatem znacznie dłuższy.

Współczesne teorie supersymetryczne przewidują czas życia protonu $\sim 10^{34}$ lat.

Super-Kamiokande zbliża się do tej granicy.

Kwarki i gluony

Jak zaobserwować cząstki, które wogóle nie mogą istnieć samodzielnie, jak np. kwarki i gluony?

Nowopowstały kwark powołuje z próżni do istnienia pary kwark-antykwarq kosztem swojej energii.

Łączy się z jednym lub dwoma z nich tworząc hadron.

Pozostałe kwarki tworzą kolejne pary, aż do wyczerpania energii i połączenia wszystkich swobodnych kwarków w hadrony.

Powstały strumień hadronów nazywamy dżetem.

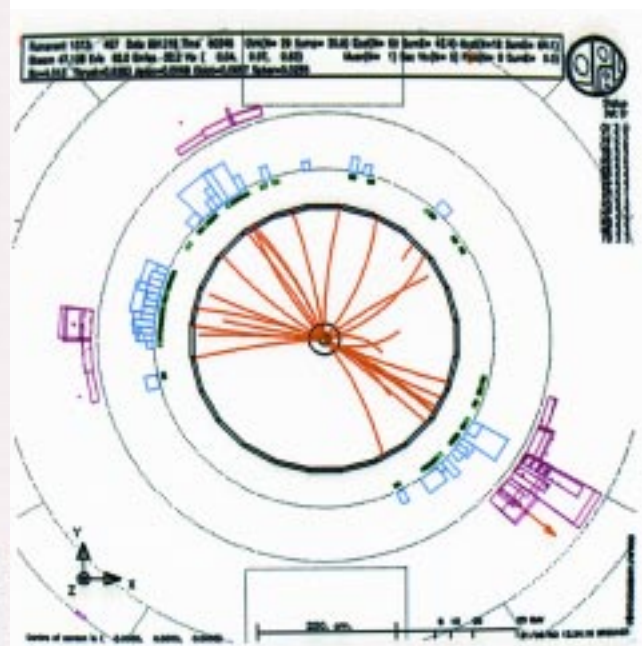
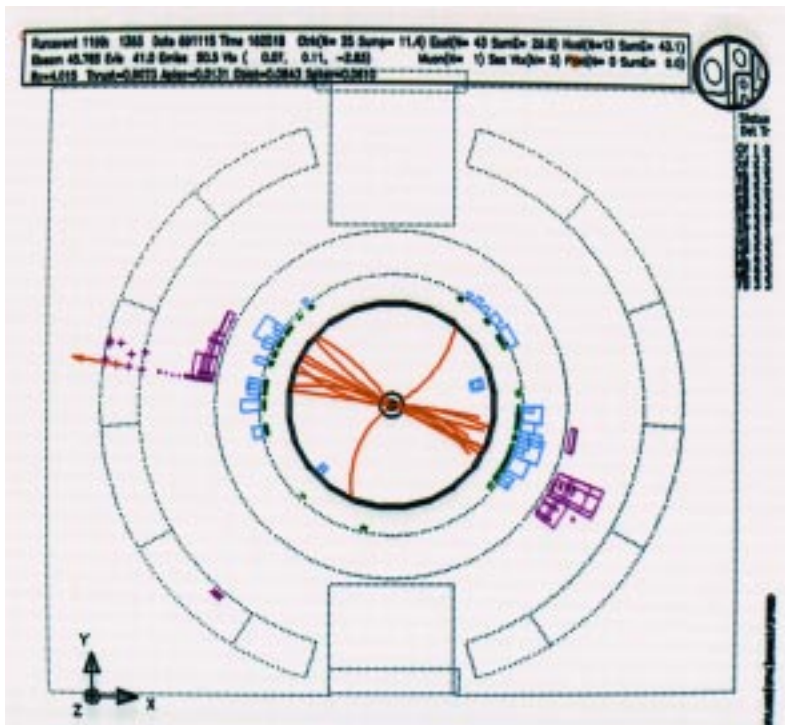
Gluon może również dać początek parze kwark-antykwarq i utworzyć dżet.

$$Z \rightarrow q \bar{q}$$

2 dżety

$$Z \rightarrow q \bar{q} g$$

3 dżety



Unifikacja oddziaływań

Wielki Wybuch Inflacja Anihilacja Bariogeneza Nukleosynteza Rekombinacja

10^{-43} s

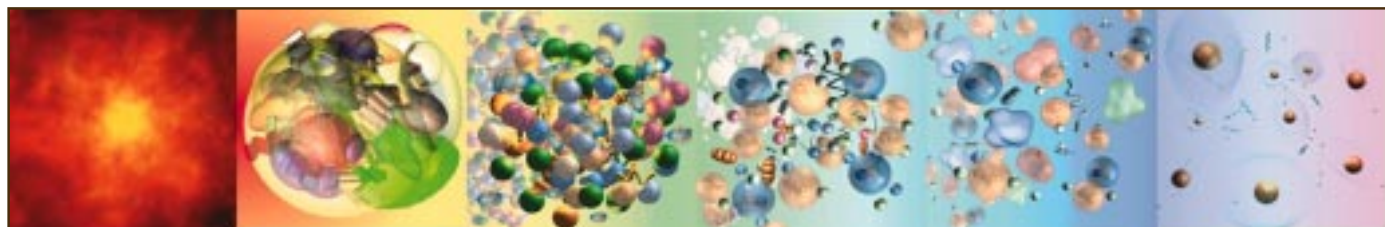
10^{-32} s

10^{-10} s

10^{-4} s

100 s

300000 lat



10^{-35} m
 10^{19} GeV

10^{-32} m
 10^{16} GeV

10^{-18} m
 10^2 GeV

10^{-16} m
1 GeV

10^{-15} m
1 MeV

10^{-10} m
10 eV

magnetyzm

QED

elektro-
magnetyzm

elektryczność

elektrosłabe

wielka
unifikacja

SUSY?

Model
Standardowy

jądrowe słabe

struny?

QCD

jądrowe silne

grawitacja

kwantowa

grawitacja

ziemska

niebieska

QED - elektrodynamika kwantowa

QCD - chromodynamika kwantowa