

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Detekcja cząstek

Maria Krawczyk, Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



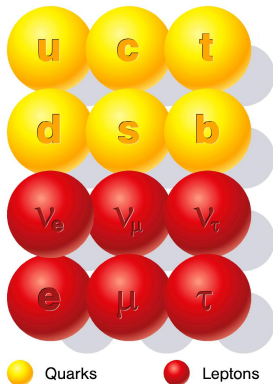
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

25 października 2016

- 1 Wprowadzenie
 - Cząstki i fale
 - Istota obserwacji w świecie cząstek
- 2 Detektory jonizacyjne
 - Emulsja fotograficzna
 - Komora mgłowa i komora pęcherzykowa
 - Detektory gazowe
 - Detektory półprzewodnikowe
- 3 Inne procesy fizyczne
 - Scyntylacja
 - Efekt fotoelektryczny
 - Promieniowanie Czerenkowa
- 4 Współczesne eksperymenty

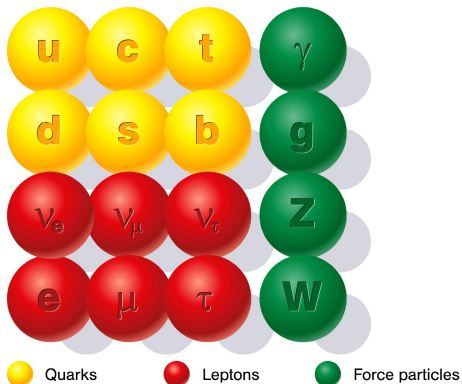
Przypomnienie

- cząstki materii
kwarki i leptony



Przypomnienie

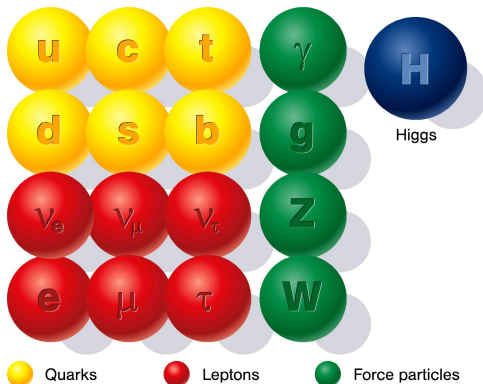
- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0



Przypomnienie

- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0
- bozon Higgsa
konieczny dla
spójności modelu

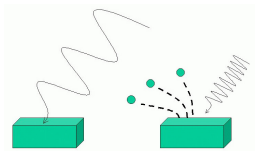
Będziemy to jeszcze
szczegółowo omawiać...



100 lat temu, w roku 1905, Albert Einstein wysunął hipotezę, że światło jest strumieniem niepodzielnych kwantów energii, które dziś nazywamy fotonami.

Efekt fotoelektryczny

Hipoteza ta wyjaśniła zależność efektu fotoelektrycznego od długości fali światła

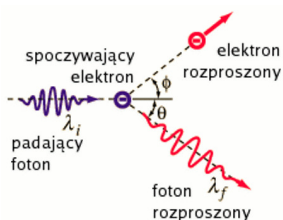


$$h\nu < E_0$$

$$h\nu > E_0$$

Rozpraszanie Comptona

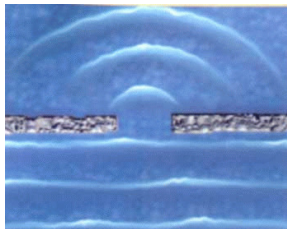
W roku 1923 Compton pokazał, że fotony niosą nie tylko energię, ale i pęd \Rightarrow zachowują się jak cząstki



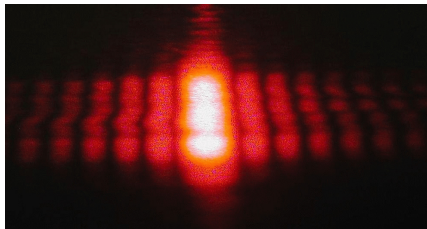
Jednocześnie jednak **fotony** zachowują się jak **fale**.
Świadczą o tym m.in. zjawisko **dyfrakcji** i **interferencji** światła.

Ugięcie fal na pojedynczej szczelinie:

Fale na wodzie



Światło



W niektórych doświadczeniach światło przejawia naturę falową, w innych z kolei zachowuje się jak strumień cząstek...

Dualizm korpuskularno-falowy

Aby opisać wyniki eksperymentalne musimy przyjąć że:

- światło (każda fala elektromagnetyczna) to **strumień fotonów**
- **rozchodzenie się światła (ruch fotonów) nie da się jednak opisać dynamiką Newtona, na podobieństwo "klasycznych" kulek**

W niektórych doświadczeniach światło przejawia naturę falową, w innych z kolei zachowuje się jak strumień cząstek...

Dualizm korpuskularno-falowy

Aby opisać wyniki eksperymentalne musimy przyjąć że:

- światło (każda fala elektromagnetyczna) to **strumień fotonów**
- **rozchodzenie się światła (ruch fotonów) nie da się jednak opisać dynamiką Newtona, na podobieństwo "klasycznych" kulek**
- rozchodzenie się światła opisują **równania Maxwella** dla fali elektromagnetycznej
- **prawdopodobieństwo detekcji** fotonu jest proporcjonalne do "klasycznego" natężenia światła

W niektórych doświadczeniach światło przejawia naturę falową, w innych z kolei zachowuje się jak strumień cząstek...

Dualizm korpuskularno-falowy

Aby opisać wyniki eksperymentalne musimy przyjąć że:

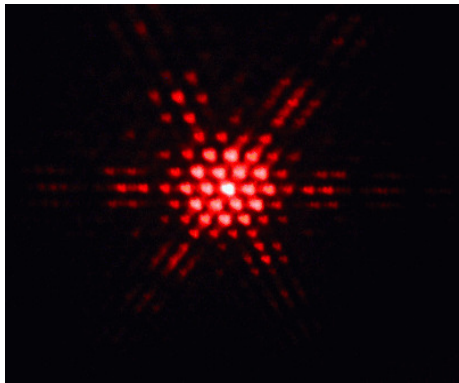
- światło (każda fala elektromagnetyczna) to **strumień fotonów**
- **rozchodzenie się światła (ruch fotonów) nie da się jednak opisać dynamiką Newtona, na podobieństwo "klasycznych" kulek**
- rozchodzenie się światła opisują **równania Maxwella** dla fali elektromagnetycznej
- **prawdopodobieństwo detekcji** fotonu jest proporcjonalne do "klasycznego" natężenia światła

⇒ foton jest cząstką, ale jego ruch nie jest deterministyczny!
Zachowanie fotonu opisane jest równaniem falowym...

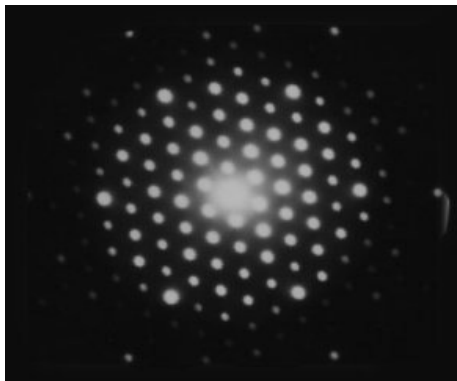
W roku 1923 Louis de Broglie wysunął hipotezę, że **wszystkie cząstki** powinny przejawiać własności **falowe** !

Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

Światło



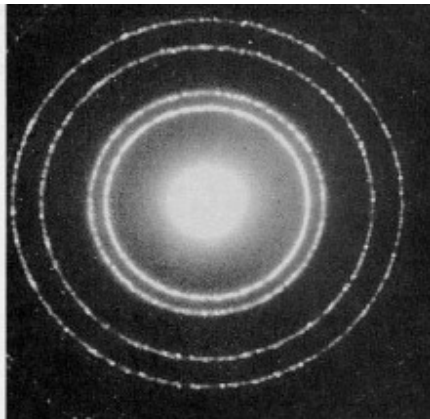
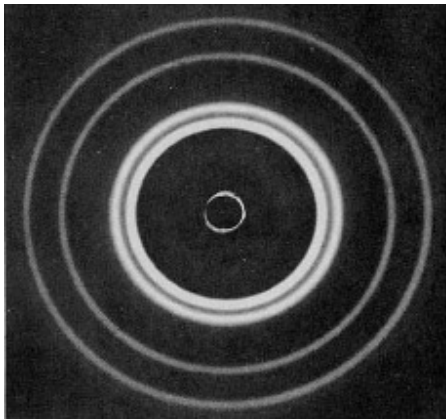
Elektrony



Obraz przy przechodzeniu przez cienką folię aluminiową

Promieniowanie X

Elektrony



Elektrony zachowują się jak fale !
Potwierdzenie hipotezy de Broglie'a.

Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. **planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. **planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

Tego typu podejście zawodzi jednak w świecie subatomowym!

Falowa natura cząstek zmusza nas do rezygnacji z podejścia deterministycznego...

Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. **planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

Mechanika kwantowa

Ruch cząstki to rozchodzenie się “**fali prawdopodobieństwa**”, które **potrafimy opisać odpowiednimi równaniami**.

Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. **planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

Mechanika kwantowa

Ruch cząstki to rozchodzenie się “**fali prawdopodobieństwa**”,
które **potrafimy opisać odpowiednimi równaniami**.

Amplituda tej fali opisuje **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu.

Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. **planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

Mechanika kwantowa

Ruch cząstki to rozchodzenie się **"fali prawdopodobieństwa"**, które potrafimy opisać odpowiednimi równaniami.

Amplituda tej fali opisuje **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu.

Dopiero dedykowany **pomiar** może rozstrzygnąć gdzie znajduje się cząstka. **Wcześniej możemy tylko "zgadywać"...**

Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. planet w Układzie Słonecznym) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

Mechanika kwantowa

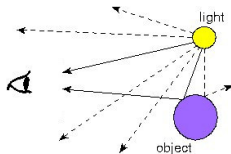
Ruch cząstki to rozchodzenie się **"fali prawdopodobieństwa"**, które potrafimy opisać odpowiednimi równaniami.

Amplituda tej fali opisuje **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu.

Dopiero dedykowany **pomiar** może rozstrzygnąć gdzie znajduje się cząstka. **Wcześniej możemy tylko "zgadywać"...**

Nie możemy **dowolnie dokładnie** poznać stanu cząstki, np. jednocześnie zmierzyć położenie i pęd - **zasada nieoznaczoności**.

Istota obserwacji



W świecie makroskopowym możliwa jest obserwacja nie zakłócająca obserwowanego procesu



Istota obserwacji

Cząstek nie możemy "zobaczyć" nie zakłócając ich stanu.
W świecie cząstek każdy pomiar wiąże się z jakimś **oddziaływaniem**.
Obserwujemy nie cząstki, ale (efekty) ich **oddziaływania z materią**.

Istota obserwacji

Cząstek nie możemy "zobaczyć" nie zakłócając ich stanu.
W świecie cząstek każdy pomiar wiąże się z jakimś **oddziaływaniem**.
Obserwujemy nie cząstki, ale (efekty) ich **oddziaływania z materią**.

Nie można zaobserwować cząstki, która nie oddziałuje!

Istota obserwacji

Cząstek nie możemy "zobaczyć" nie zakłócając ich stanu.
W świecie cząstek każdy pomiar wiąże się z jakimś **oddziaływaniem**.
Obserwujemy nie cząstki, ale (efekty) ich **oddziaływania z materią**.

Nie można zaobserwować cząstki, która nie oddziałuje!

Podstawowe procesy wykorzystywane do detekcji cząstek:

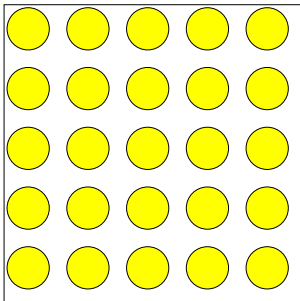
- jonizacja i scyntylacja
- efekt fotoelektryczny
- promieniowanie Czerenkowa

Struktura materii

Własności różnych substancji zależą od tego jak silnie związane są najbardziej “zewnątrzne” elektrony (walencyjne)

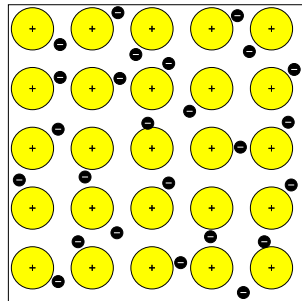
Izolator

Wszystkie elektrony silnie **związane** z atomami



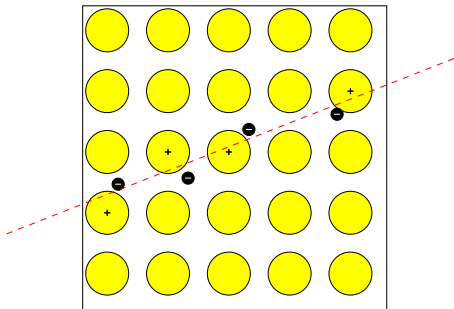
Przewodnik

Elektrony walencyjne są **“uwspólnione”**, mogą swobodnie się przemieszczać



Jonizacja

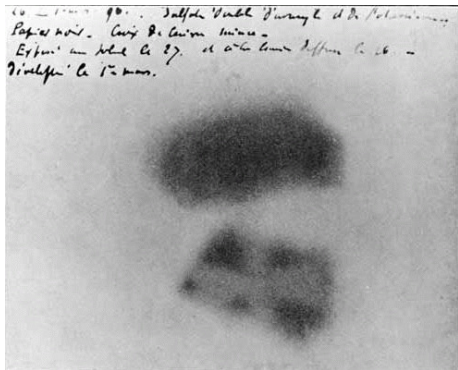
U podstaw działania przeważającej większości detektorów cząstek elementarnych leży **zjawisko jonizacji**:



Cząstka naładowana przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z elektronami i oddaje im część swojej energii **“wybijając”** je z atomów.

Pojawiają się swobodne nośniki ładunku

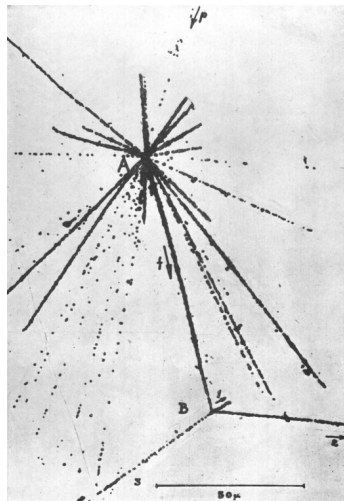
Emulsja fotograficzna



H. Becquerel, 1896

wzbudzone atomy

⇒ reakcja chemiczna

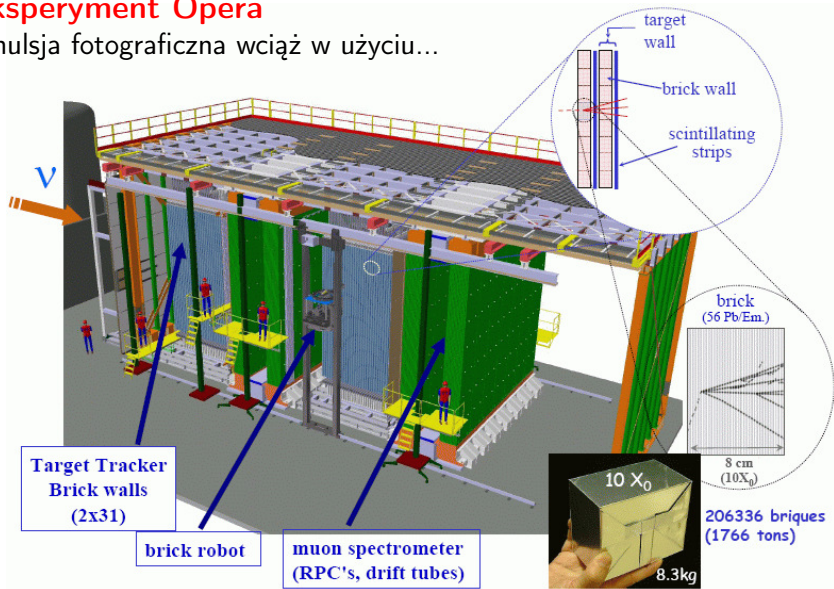


M. Danysz i J. Pniewski, 1953

Detekcja cząstek

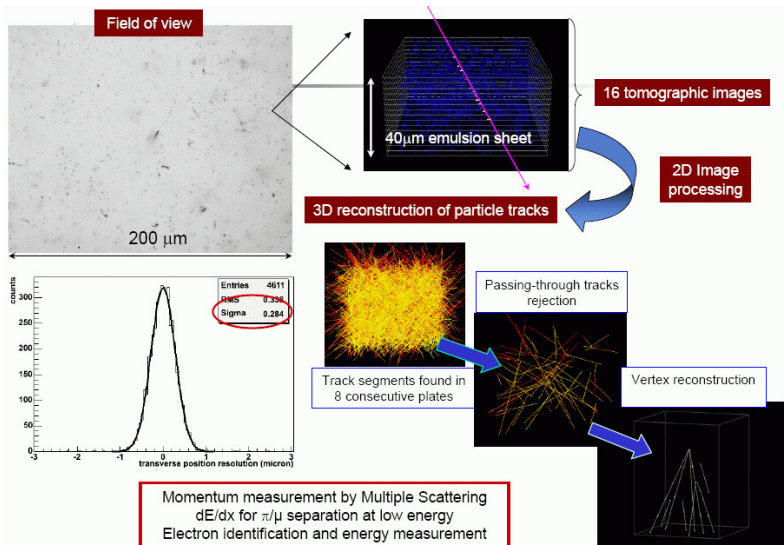
Eksperyment Opera

Emulsja fotograficzna wciąż w użyciu...



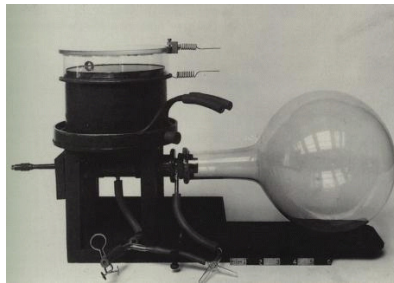
Emulsja fotograficzna

eksperyment OPERA



Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911

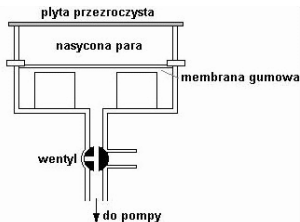


jonizacja

⇒ jony

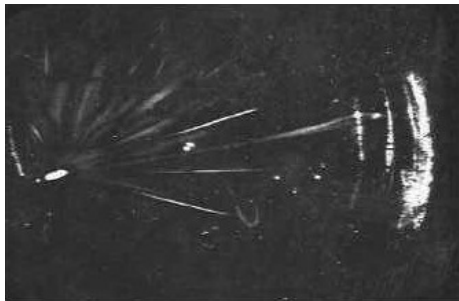
⇒ kondensacja pary

⇒ ślad w postaci mgły

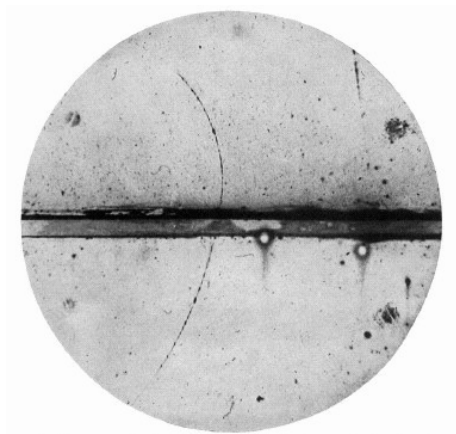


Komora Wilsona

Charles Wilson, 1911

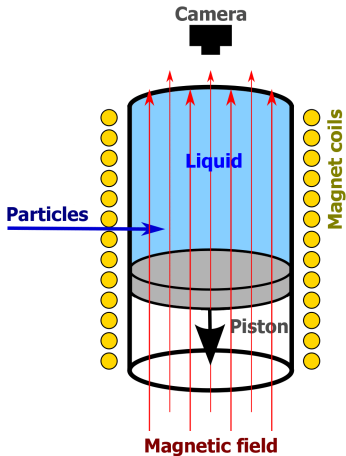


Carl Anderson, 1932

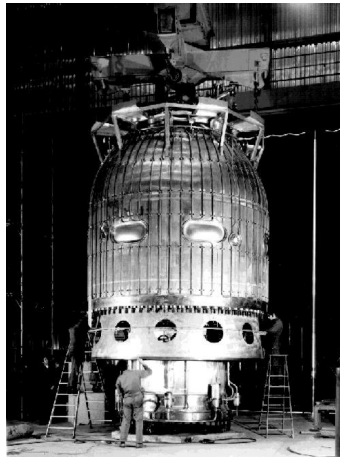


odkrycie pozytonu

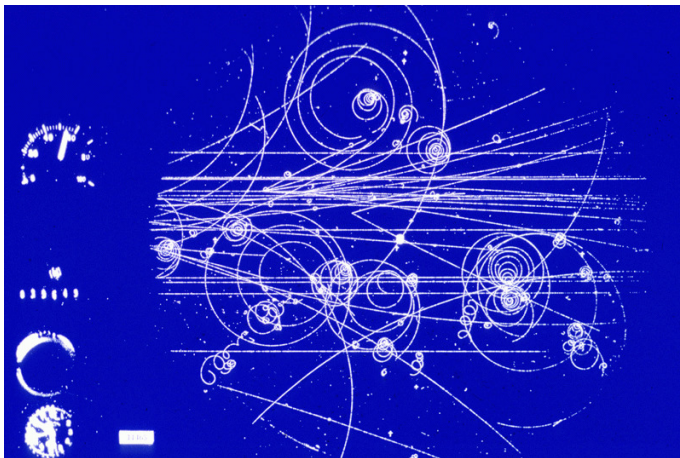
Komora pęcherzykowa, 1952



jonizacja \Rightarrow wrzenie przegrzanej cieczy



Komora pęcherzykowa

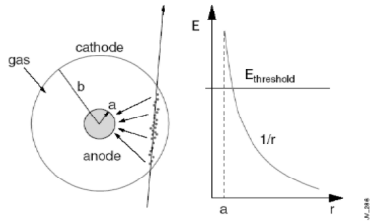


Ciecz pełni też rolę “tarczy”, z którą oddziałują cząstki wiązki

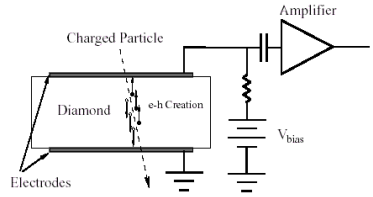
Pomiar jonizacji

Jonizacja ośrodka oznacza powstanie w nim **swobodnych ładunków**:
możliwy jest **przepływ prądu**.

w gazie



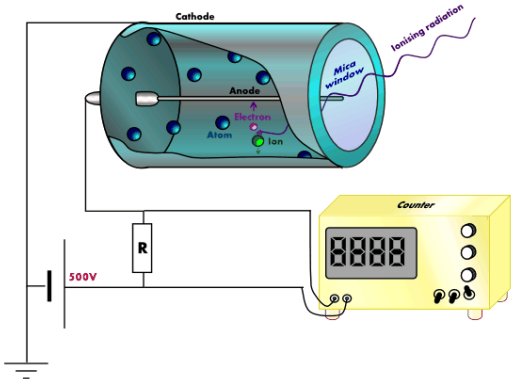
w półprzewodniku



Przepływający ładunek jest na ogół bardzo mały,
ale czuła elektronika pozwala go wzmocnić i zmierzyć.
Na tej zasadzie opiera się **większość współczesnych detektorów**.

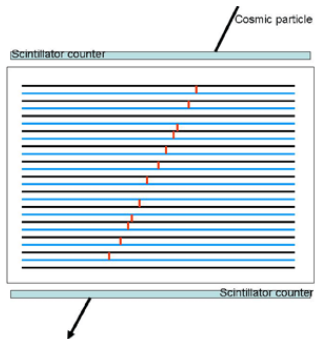
Licznik Geigera-Müllera

Przykładając odpowiednio wysokie napięcie powodujemy, że powstałe w wyniku jonizacji elektrony zderzając się z atomami wybijają kolejne elektrony - powielanie ładunku.



Komora iskrowa

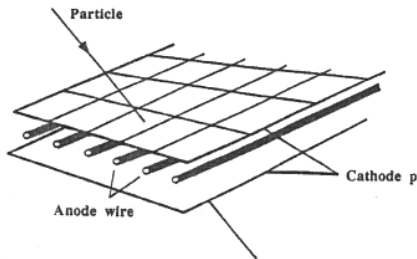
Jonizacja powoduje przeskok iskry pomiędzy elektrodami



Możliwość wyboru zdarzeń
(sterowanie napięciem)

Komora wielodrutowa

Georges Charpak 1970
(Nobel 1992)



Tanie!
Odczyt w pełni elektroniczny!
elektronika+komputer
⇒ rewolucja

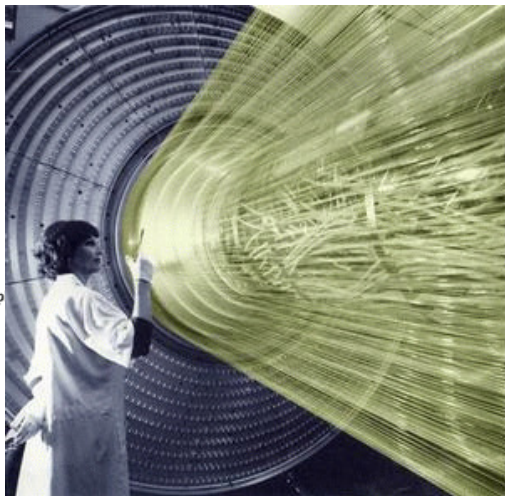


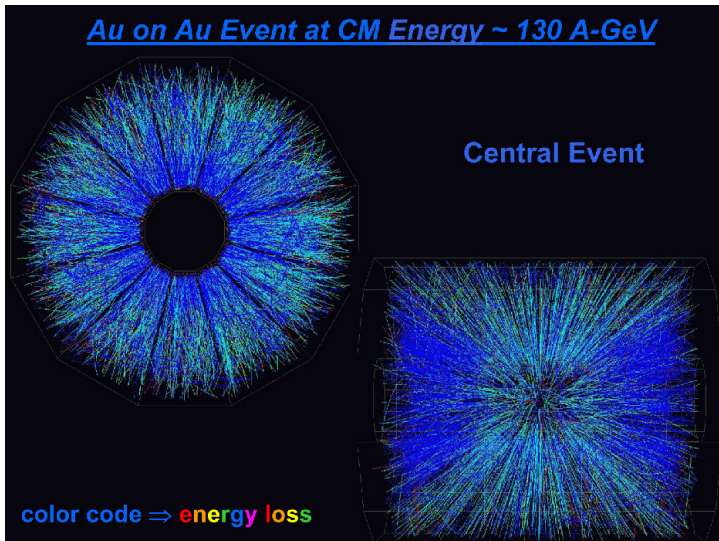
Photo: SLAC, USA

TPC

Komora
projekcji
czasowej

Przypadek
zderzenia
ciężkich jonów

detektor STAR
przy RHIC



Detektory półprzewodnikowe

Bardzo różne technologie, m.in. CCD (używane w fotografii cyfrowej)

Każdy aparat cyfrowy jest detektorem cząstek!

Zdjęcie z kamery astronomicznej.



Wycinek:

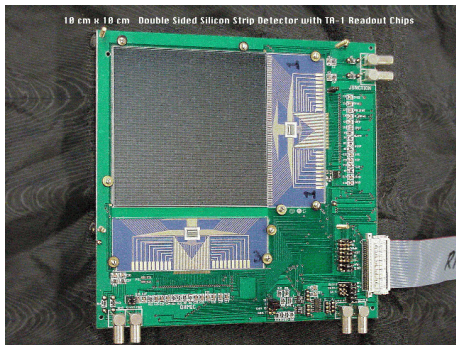


To nie UFO. To ślad cząstki...

Detektory półprzewodnikowe

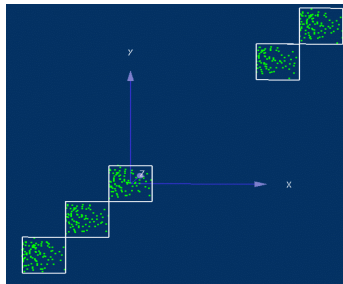
Coraz powszechniej używane.

Element detektora krzemowego



Bardzo precyzyjny pomiar pozycji cząstek (rzędu μm)

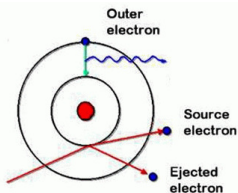
Mierzone punkty przejścia wiązki cząstek przez pięć warstw detektora testowego:



Mierząc pozycje w wielu warstwach możemy zrekonstruować tor.

Scyntyłacja

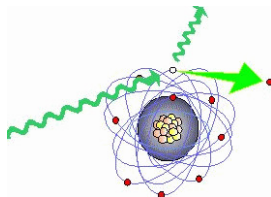
W wyniku przejścia cząstki naładowanej elektron może być “wyrwany” z atomu, lub przeniesiony na wyższą powłokę (wzbudzenie atomu).



Powrotowi atomu do stanu podstawowego może towarzyszyć wyświecanie fotonów: **scyntyłacja**

Fotony

Także fotony mogą oddziaływać z elektronami w atomie. Przekazują im całą swoją energię (efekt fotoelektryczny) lub tylko część (rozpraszanie Comptona).

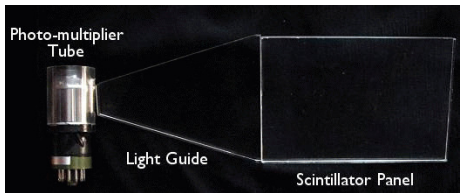
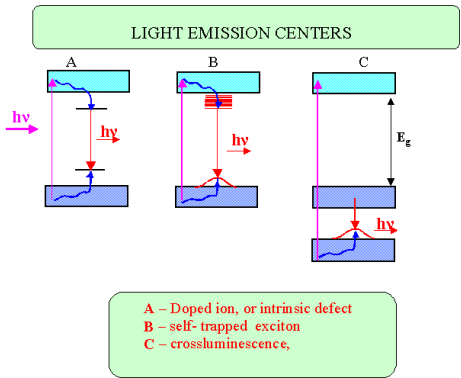


W obu przypadkach elektron może zostać “wyrwany” z atomu.

Scytylacja

W szeregu materiałów atomy wzbudzone na skutek jonizacji emitują fotony światła

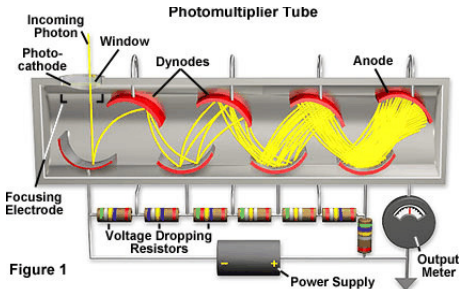
Błysk światła w scyntylatorze możemy rejestrować przy pomocy fotopowielacza



Brak pomiaru pozycji
Bardzo dobry pomiar czasu przejścia cząstki

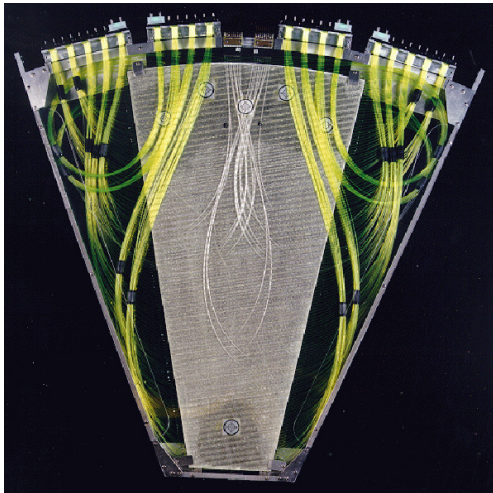
Fotopowielacz

Aby móc zmierzyć pojedynczy foton musimy wzmocnić pojawiający się ładunek. Na kolejnych elektrodach (tzw. dynodach) każdy elektron wybija kilka elektronów wtórnych - powstaje lawina



Jeden foton, jeśli tylko uda mu się wybić pierwszy elektron (efekt fotoelektryczny) powoduje przepływ makroskopowego prądu.

Detektory scyntylacyjne

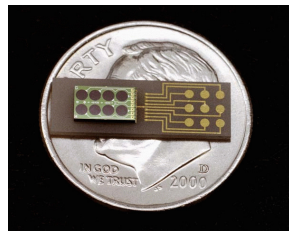


Tradycyjne liczniki scyntylacyjne coraz rzadziej używane.

Nowe koncepcje:

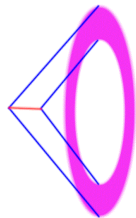
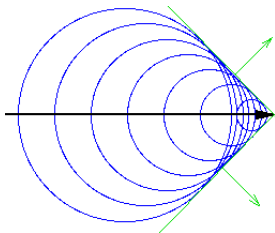
⇐ włókna scyntylujące,

fotopowielacze krzemowe ↓



Promieniowanie Czerenkowa

Emitowane przez cząstkę poruszającą się w ośrodku z prędkością większą niż prędkość światła w tym ośrodku.



Światło emitowane na pewnym odcinku widoczne jest w postaci charakterystycznych pierścieni

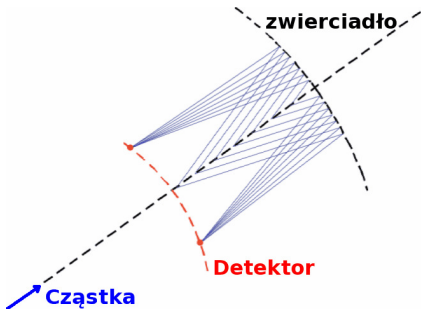
Zachodzi w wodzie, lodzie, powietrzu...

Tania technologia dla dużych detektorów!

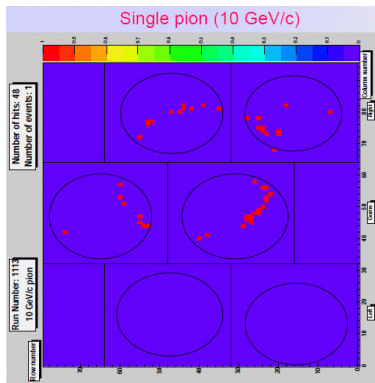
Promieniowanie Czerenkowa

Jeśli droga cząstki przez ośrodek jest dłuższa, możemy zastosować specjalne zwierciadła, żeby skupić emitowane światło

Schemat



Obraz w detektorze

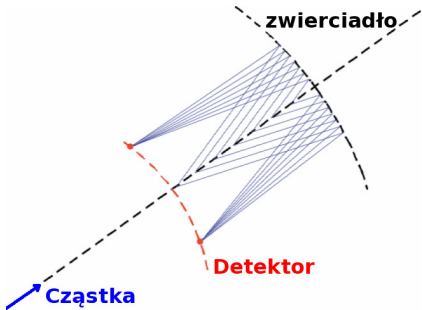


Detekcja cząstek

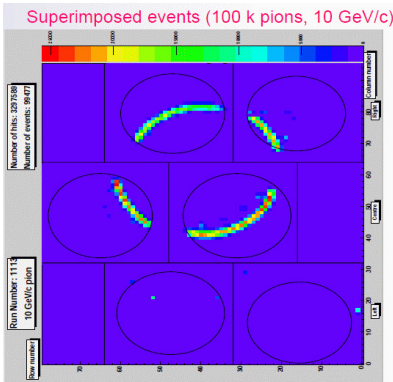
Promieniowanie Czerenkowa

Jeśli droga cząstki przez ośrodek jest dłuższa, możemy zastosować specjalne zwierciadła, żeby skupić emitowane światło

Schemat



Obraz w detektorze

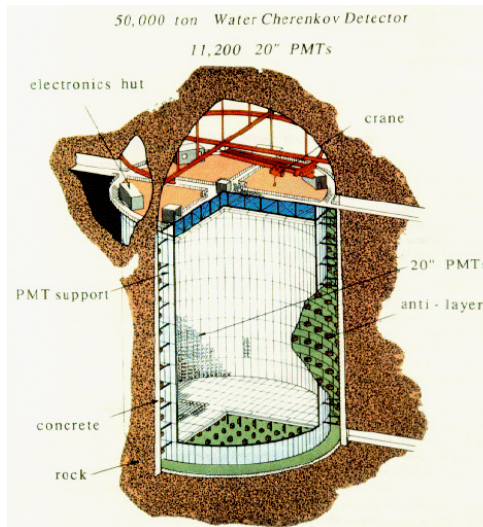


Super-Kamiokande eksperyment neutronowy

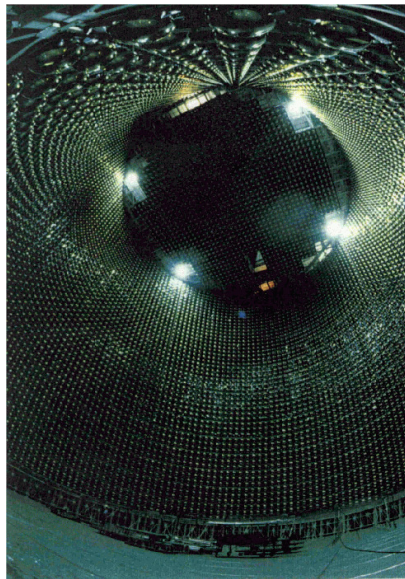
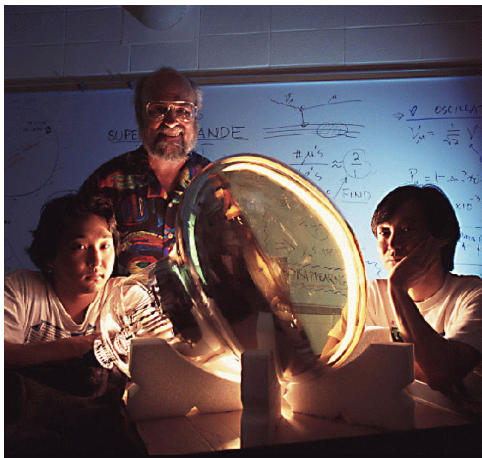
Japonia, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **wodą**

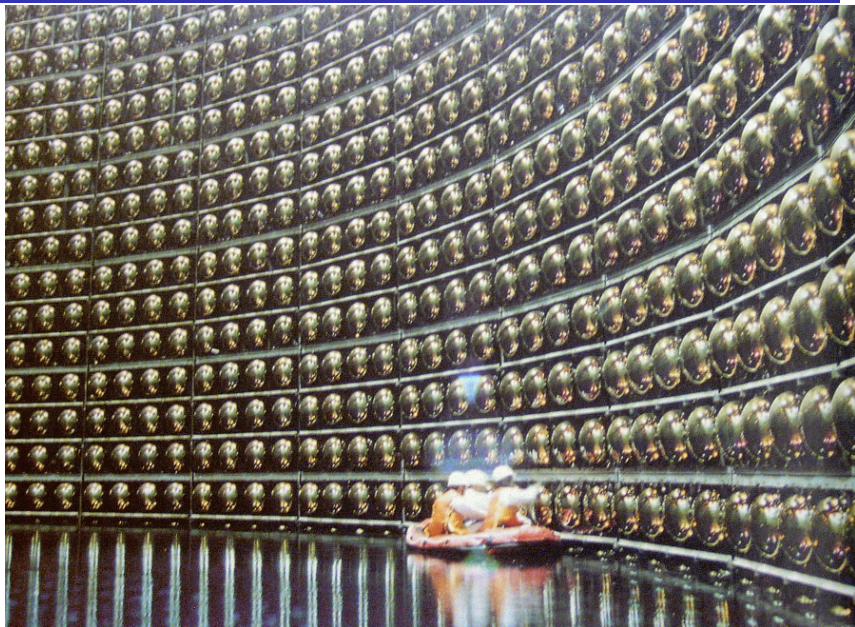
11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**



Super-Kamiokande





Super-Kamiokande

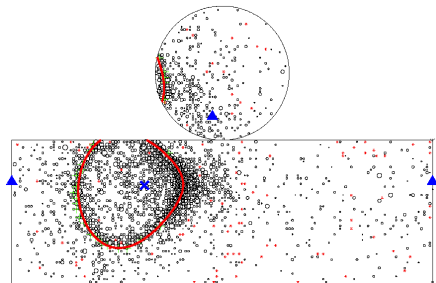
Przykłady obserwowanych oddziaływań neutrin.

Neutrino elektronowe

Przypadek $\nu_e n \rightarrow e^- p$

Krótki zasięg elektronu

“cienki” pierścień

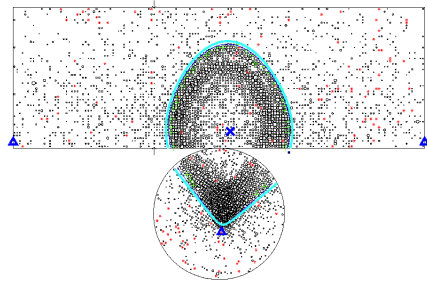


Neutrino mionowe

Przypadek $\nu_\mu n \rightarrow \mu^- p$

Długa droga mionu w wodzie

“gruby” pierścień.



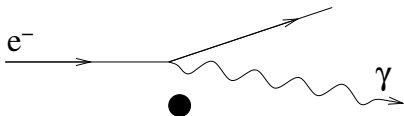
Kalorymetry

Wszystkie przedstawione do tej pory detektory rejestrowały przejście cząstki, ślad cząstki w materii \Rightarrow detektory śladowe.

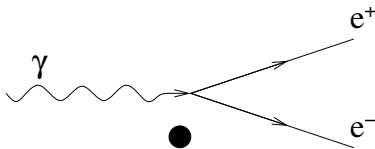
Aby zmierzyć energię cząstki musimy sprawić, aby w wyniku wielokrotnych oddziaływań "oddała ją" w całości detektorowi \Rightarrow kalorymetry.

Kalorymetr elektromagnetyczny

Wysokoenergetyczne elektrony tracą energię prawie wyłącznie na **promieniowanie hamowania**



Wysokoenergetyczne fotony ulegają **konwersji na parę $e^+ e^-$**

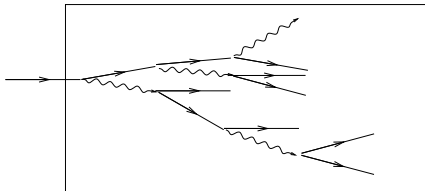


Kalorymetry

Wysokoenergetyczny **elektron lub foton** wpadając do detektora wywołuje **kaskadę** składającą się z $N \sim E$ cząstek

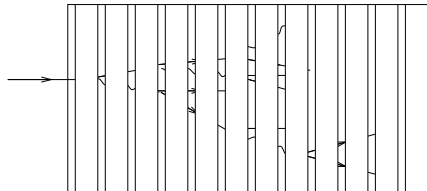
Mierząc liczbę cząstek lub całkowitą długość torów (całkowitą jonizację) możemy dokładnie określić energię cząstki początkowej

Kalorymetr jednorodny



np. blok scyntyлятора

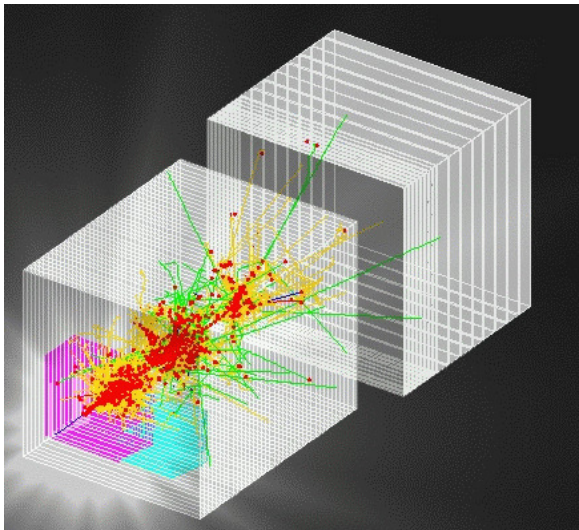
Kalorymetr próbkujący



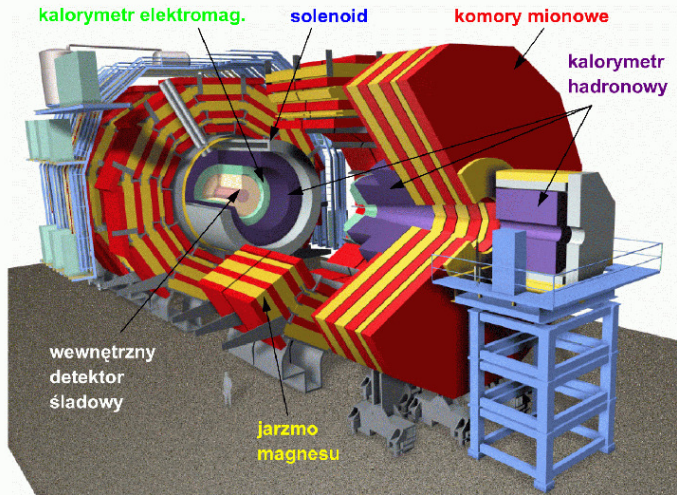
warstwy detektora na przemian z gęstym absorberem

Kalorymetry

Symulacja rozwoju kaskady hadronowej (pomiar energii protonu)



Compact Muon Solenoid



- Cząstki mają naturę falową, ich zachowanie nie jest ściśle deterministyczne
- Nie obserwujemy cząstek, a jedynie efekty ich oddziaływania

- Cząstki mają naturę falową, ich zachowanie nie jest ściśle deterministyczne
- Nie obserwujemy cząstek, a jedynie efekty ich oddziaływania
- Możemy wykorzystać różne procesy do detekcji cząstek
 - Jonizację
 - ⇒ detektory gazowe, detektory półprzewodnikowe

- Cząstki mają naturę falową, ich zachowanie nie jest ściśle deterministyczne
- Nie obserwujemy cząstek, a jedynie efekty ich oddziaływania
- Możemy wykorzystać różne procesy do detekcji cząstek
 - Jonizację
 - ⇒ detektory gazowe, detektory półprzewodnikowe
 - Scyntyłację
 - Efekt fotoelektryczny
 - Promieniowanie Czerenkowa

- Cząstki mają naturę falową, ich zachowanie nie jest ściśle deterministyczne
- Nie obserwujemy cząstek, a jedynie efekty ich oddziaływania
- Możemy wykorzystać różne procesy do detekcji cząstek
 - Jonizację
 - ⇒ detektory gazowe, detektory półprzewodnikowe
 - Scyntyłację
 - Efekt fotoelektryczny
 - Promieniowanie Czerenkowa
 - Powstawanie kaskad cząstek wtórnych
 - ⇒ kalorymetry

- Cząstki mają naturę falową, ich zachowanie nie jest ściśle deterministyczne
- Nie obserwujemy cząstek, a jedynie efekty ich oddziaływania
- Możemy wykorzystać różne procesy do detekcji cząstek
 - Jonizację
 - ⇒ detektory gazowe, detektory półprzewodnikowe
 - Scyntyłację
 - Efekt fotoelektryczny
 - Promieniowanie Czerenkowa
 - Powstawanie kaskad cząstek wtórnych
 - ⇒ kalorymetry

O tym jak z tych elementów zbudowane są współczesne eksperymenty opowiemy na kolejnych wykładach...