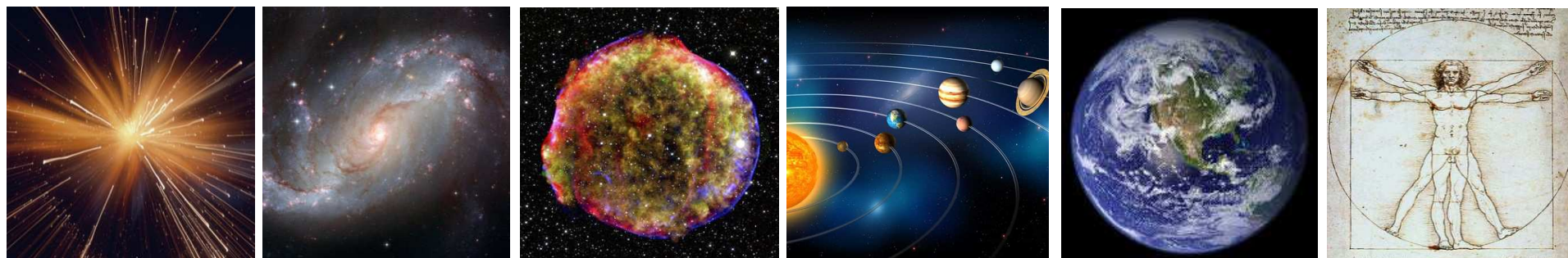


Współczesna fizyka cząstek elementarnych i jądra atomowego

Wprowadzenie do fizyki subatomowej

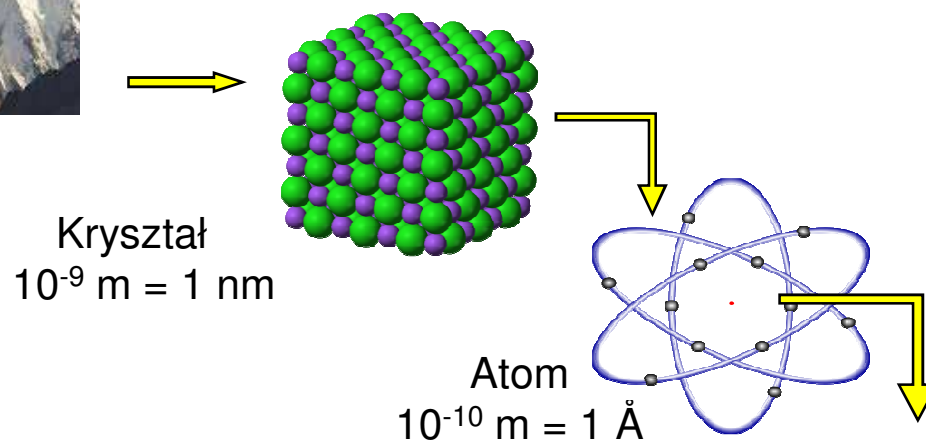
Marek Pfützner

Zakład Fizyki Jądrowej, Wydział Fizyki UW



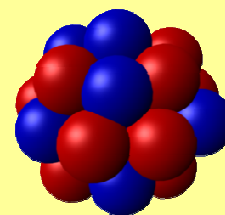


Hierarchiczna budowa materii

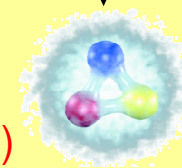


Fizyka subatomowa

Jądro atomu
 $10^{-14} \text{ m} = 10 \text{ fm}$



Nukleon
(proton, neutron)
 $10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$



Kwarki, elektrony
elementarne ? punktowe ?



Koniec XIX wieku

„Świat nie ma już dziś dla nas tajemnic”

Marcelin Berthelot, 1885

„Pieter Zeeman w wieku dojrzałym lubił opowiadać, że kiedy był młodym człowiekiem, to ostrzegano go, żeby nie studiował fizyki. ‘Fizyka nie jest już dziedziną obiecującą’ – mówiono mu; ‘jest ona skończona i nie ma tam miejsca na cokolwiek istotnie nowego’. Musiało to być około roku 1883”

relacja Hendrika Casimira

„Wszystkie najważniejsze fundamentalne prawa i fakty w fizyce zostały już odkryte i tak dobrze ustalone, iż jest znikome prawdopodobieństwo, że zostaną one uzupełnione w wyniku nowych odkryć... Przyszłych nowych prawd w fizyce trzeba będzie szukać na szóstym miejscu po przecinku”

Albert A. Michelson, 1894

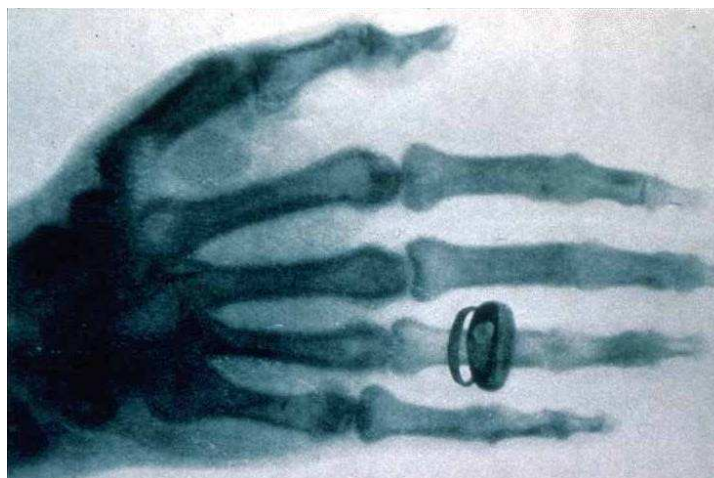
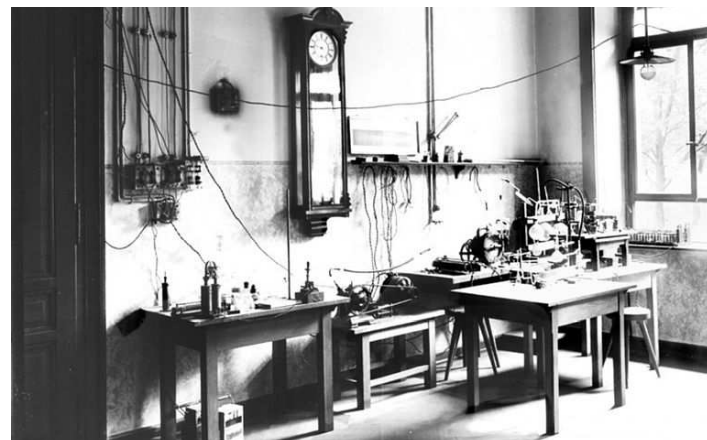
„Historia fizyki”, A.K. Wróblewski, PWN, 2006

Początek – promienie X

- W 1895 roku w Würzburgu Röntgen podczas badań promieni katodowych odkrył przenikliwe promieniowanie X. Za to odkrycie otrzymał pierwszą nagrodę Nobla z fizyki (1901)



Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923)



Promienie uranowe

- W 1896 roku w Paryżu Becquerel przypadkiem odkrył świat zupełnie nowych zjawisk fizycznych, gdy wywołał płytkę fotograficzną, na której leżał kawałek soli uranowej.



Antoine Henri Becquerel (1852-1908)



Becquerel ogłosił też obserwację odbicia, załamania i polaryzacji promieni uranowych, co sugerowało, że są one formą światła i co początkowo zmniejszyło zainteresowanie tym odkryciem.

Odkrycie elektronu

- W 1897 roku w Cambridge Thomson badał ugięcie promieni katodowych w polach E i B. Wyciągnął wniosek, że promienie te składają się z cząstek, dla których wyznaczył stosunek m/e



Joseph John Thomson
J. J. Thomson

SIR J. J. THOMSON

Joseph John Thompson (1856-1940)



Nagroda Nobla z fizyki, 1906

Maria Skłodowska Curie



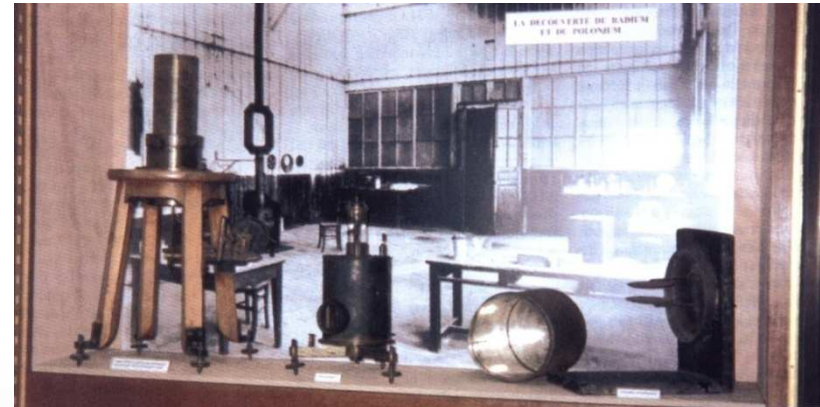
Maria Skłodowska - Curie (1867-1934)



Piotr Curie (1859-1906)

➤ W 1898 roku Maria Curie zajęła się promieniami uranowymi

- jako pierwsza zastosowała metodę ilościową
- wprowadziła termin „promieniotwórczość” („radioactivity”)
- niezależnie odkryła, że promieniotwórczy jest także tor
- zauważyła, że promieniotwórczość jest cechą atomową
- odkryła dwa nowe pierwiastki chemiczne, polon i rad





The Nobel Prize in Physics 1903

Henri Becquerel, Pierre Curie, Marie Curie

The Nobel Prize in Physics 1903

Henri Becquerel

Pierre Curie

Marie Curie



Antoine Henri
Becquerel



Pierre Curie



Marie Curie, née
Sklodowska

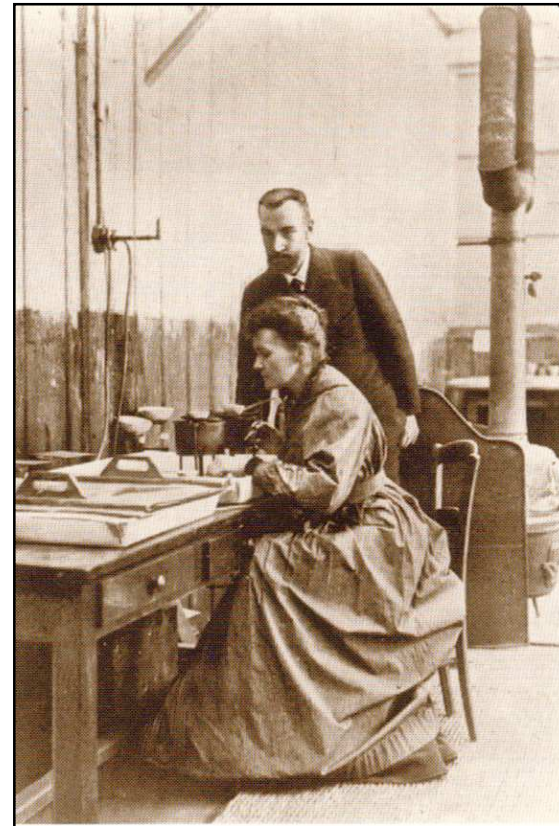
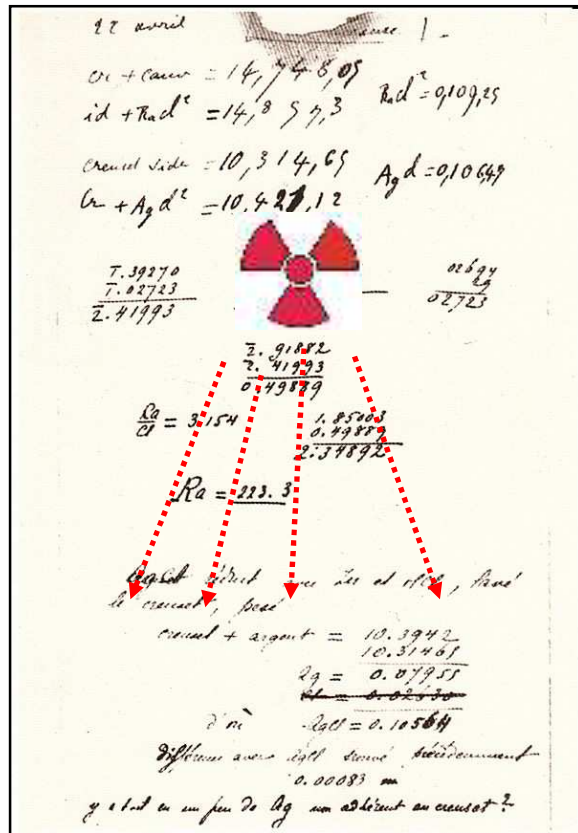
The Nobel Prize in Physics 1903 was divided, one half awarded to Antoine Henri Becquerel "in recognition of the extraordinary services he has rendered by his discovery of spontaneous radioactivity", the other half jointly to Pierre Curie and Marie Curie, née Skłodowska "in recognition of the extraordinary services they have rendered by their joint researches on the radiation phenomena discovered by Professor Henri Becquerel".



Nagroda Nobla z fizyki, 1903:

„w uznaniu ich nadzwyczajnych osiągnięć uzyskanych dzięki wspólnym badaniom nad zjawiskiem promieniotwórczości odkrytym przez Profesora Henri Becquerela”

→ Instytut Radowy w Paryżu, 11 rue Pierre-et-Marie-Curie



Nagroda Nobla z chemii, 1911:

„w uznaniu jej zasług dla rozwoju chemii przez odkrycie pierwiastków radu i polonu, wydzielenie radu i badania właściwości i związków tego wyjątkowego pierwiastka”

Ernest Rutherford



Ernest Rutherford (1871-1937)

- Wydzielił dwie składowe promieniowania (1899):

α – mało przenikliwe, ciężkie, ładunek dodatni

β – bardziej przenikliwe, lekkie, ładunek ujemny
(→ to elektrony!)

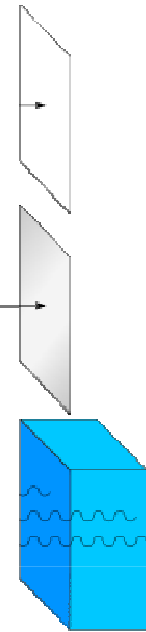
α



β



γ

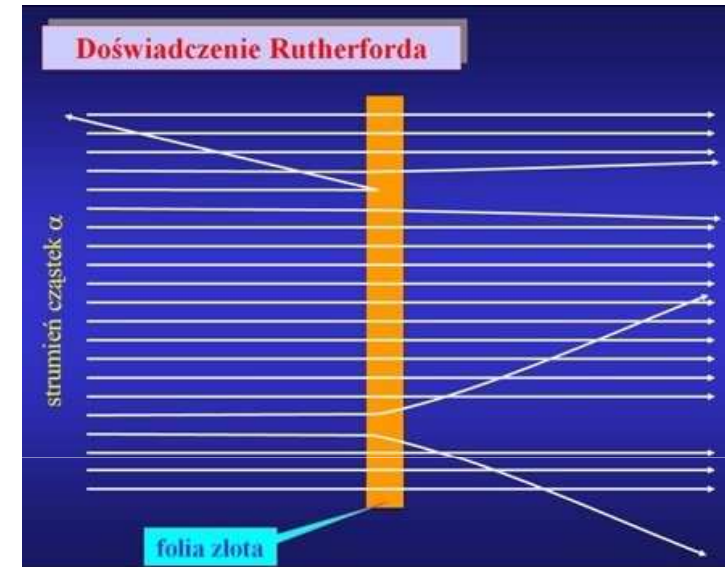
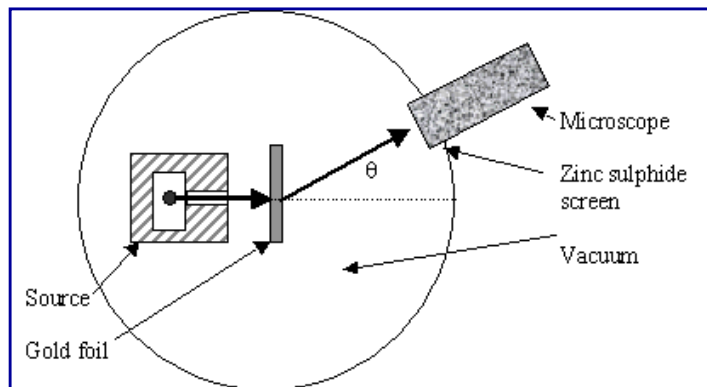


- Nazwał najbardziej przenikliwe, γ , odkryte w 1900 (P. Villard)
- Sformułował wykładnicze prawo spontanicznych przemian promieniotwórczych
- Odkrył, że cząstki α to zjonizowane atomy helu

Nagroda Nobla z chemii, 1908: „za badania rozpadów pierwiastków i własności chemicznych substancji promieniotwórczych”

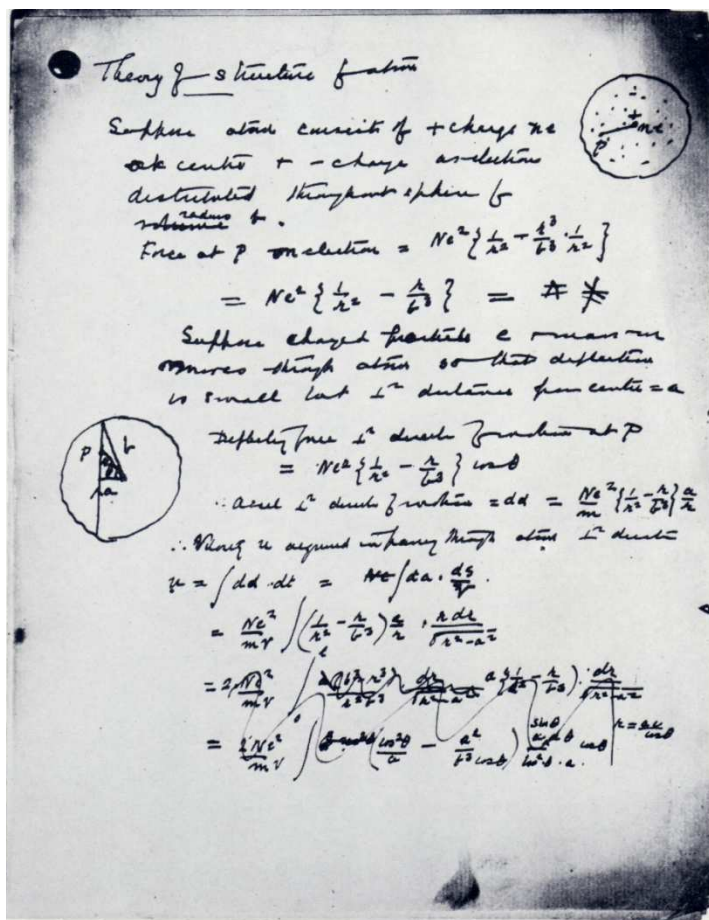
Rozpraszanie cząstek α

- Współpracownicy Rutherforda, H. Geiger i E. Marsden badali rozpraszanie cząstek α na cienkiej folii złota (Manchester, 1907-9). W większości przypadków tor cząstek ugiął się pod małymi kątami. Okazało się jednak, że czasem cząstka α rozprasza się do tyłu!



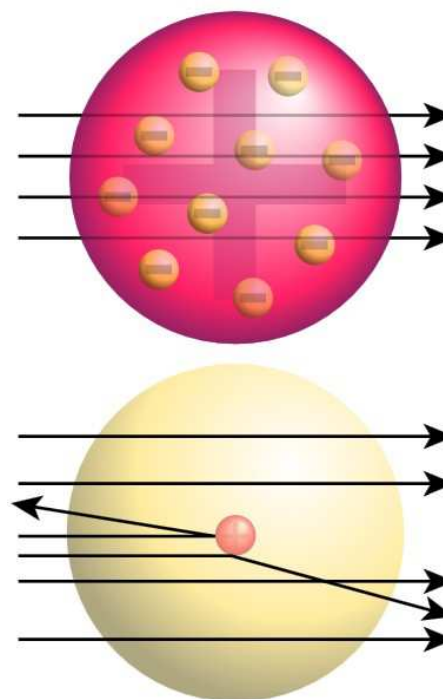
Rutherford: "To było chyba najbardziej niewiarygodne zdarzenie w moim życiu. To tak, jakby pocisk artyleryjski wielkiego kalibru, wystrzelony w kierunku cienkiej kartki papieru, odbił się od niej i powrócił do strzelającego".

Jądro atomowe



Rutherford's first rough note on the nuclear theory of atomic structure; written, probably, in the winter of 1910-11

Philosophical Magazine, May 1911,
ser.6, xxi, pp.669-88



$$P(\theta) \propto \frac{1}{\sin^4 \theta/2}$$

- Praktycznie cała masa atomu skupiona jest w bardzo małym centralnym punkcie nazwanym **jądrem atomowym**

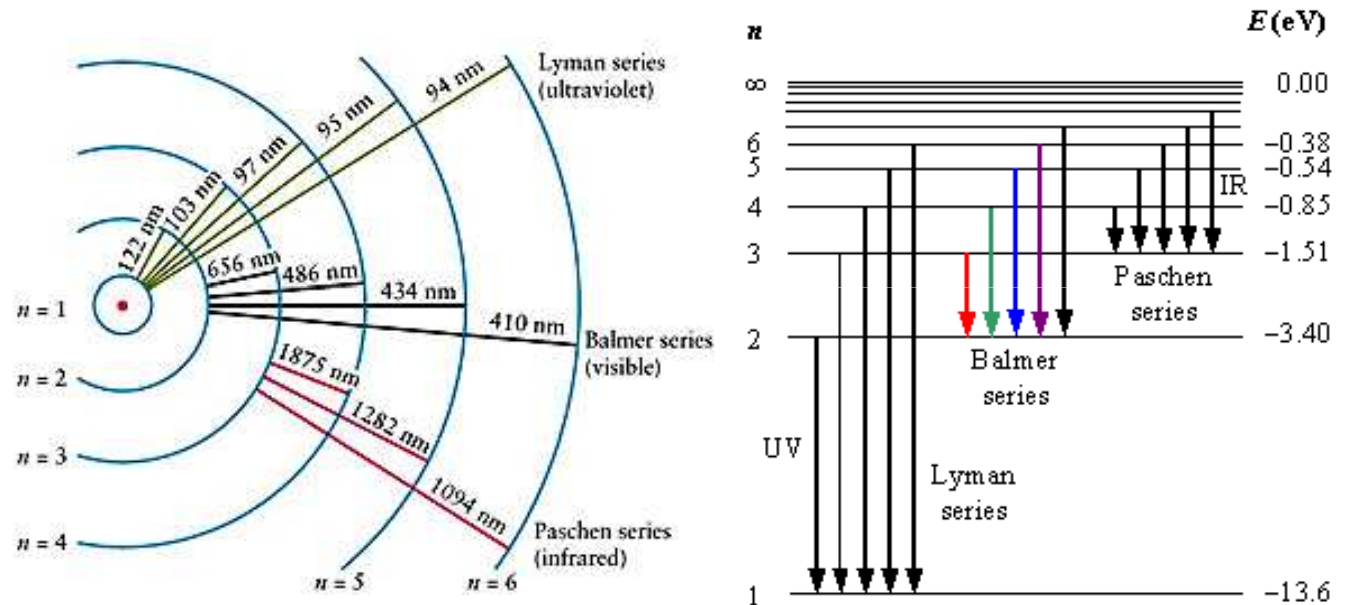
Niels Bohr i jego atom

- Elektrony mogą znajdować się w różnych stanach (orbitach) o dyskretnych wartościach energii. Przejścia między tymi stanami związane są z emisją (lub absorpcją) promieniowania elektromagnetycznego (fotonów).



Niels Bohr (1885-1962)

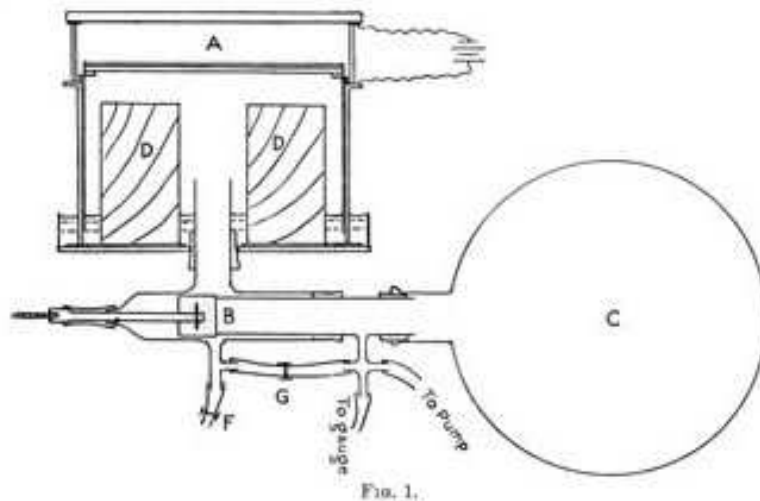
Nagroda Nobla z fizyki, 1922



- W zależności od różnicy energii między stanami, emitowane jest promieniowanie X, UV, widzialne lub podczerwone.

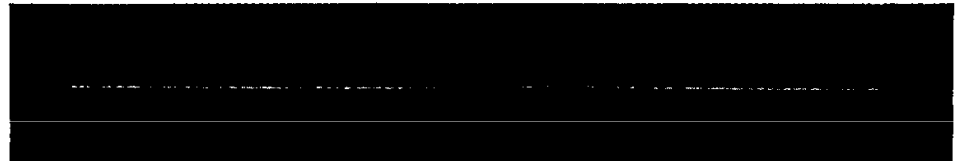
Komora mgłowa Wilsona

- ▶ Charles Wilson skonstruował komorę mgłową do badania tworzenia chmur i zjawisk optycznych w wilgotnym powietrzu. Szybko zauważył, że w przesyconej parze kropelki kondensują na jonach wytworzonych przez przelatującą cząstkę naładowaną



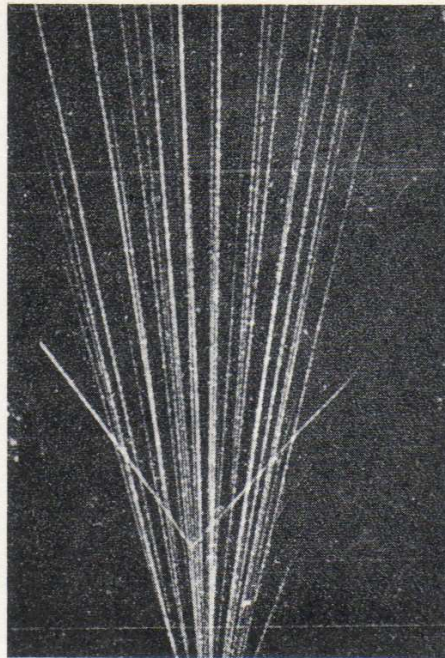
A diagram of Wilson's apparatus. The cylindrical cloud chamber ('A') is 16.5cm across by 3.4cm deep.

1911 Pierwsze zdjęcia śladów cząstek α



Nagroda Nobla z fizyki, 1927:

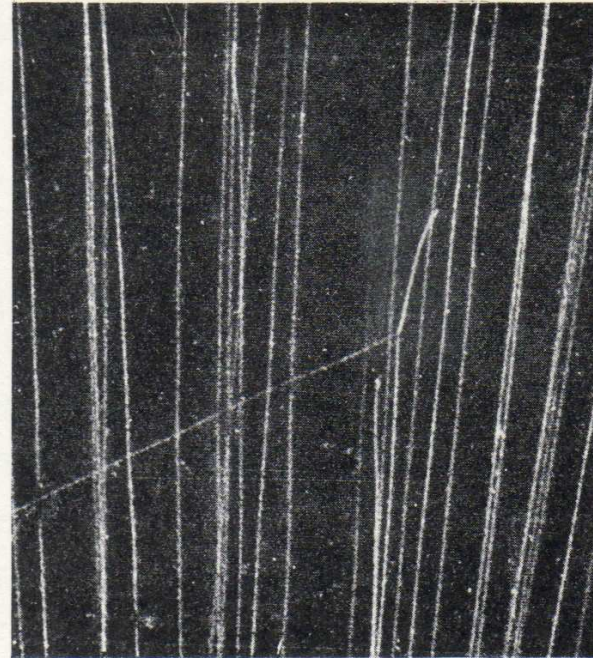
„za opracowanie metody, która pozwala uwidocznic tory cząstek naładowanych elektrycznie poprzez kondensację pary”



Alpha particle strikes helium nucleus and they part at right angles (Blackett)

1923

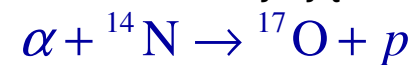
Rozpraszanie cząstki α
na atomie helu



Alpha particle enters nitrogen which ejects proton and becomes oxygen (Blackett)

1925

Pierwsza reakcja jądrowa



P. Blackett zrobił 23 000 fotografii i znalazł 8 przypadków reakcji!

Nagroda Nobla z fizyki, 1948: „za ulepszenie komory mgłowej Wilsona...”

Pozyton



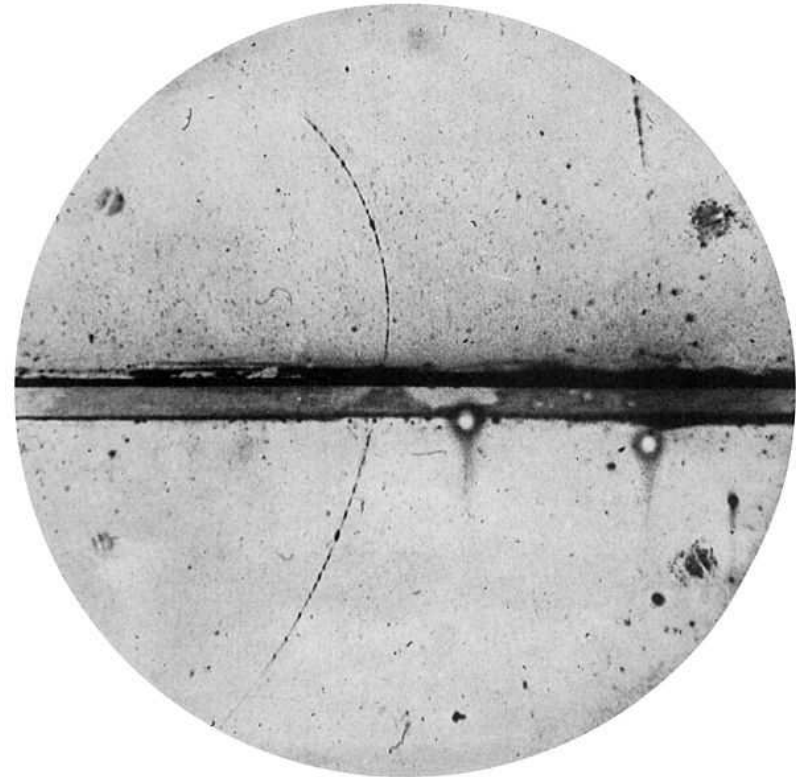
Carl D. Anderson (1905-1991)

W 1932 roku ogłosił obserwację cząstki o masie i ładunku podobnej do elektronu, ale o przeciwnym ładunku. Było to pierwsze odkrycie antycząstki

Nagroda Nobla z fizyki, 1936:

„za odkrycie pozytonu”

- ▶ Carl Anderson badał promieniowanie kosmiczne przy użyciu komory Wilsona z polem magnetycznym.

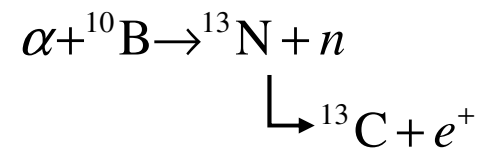
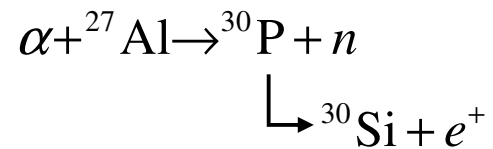


Promień krzywizny toru po obu stronach płytki ołowianej pozwala ustalić kierunek ruchu cząstki

Neutron

- Już ok. 1920 r. Rutherford przypuszczał, że w skład jądra powinna wchodzić jeszcze jakaś cząstka obojętna elektrycznie, którą nazwał **neutronem** (ta nazwa pojawiła się po raz pierwszy w 1921 r.). Po 12 latach poszukiwań neutron został odkryty w ciekawych okolicznościach.
- 28 stycznia 1932 - Irena i Frederic Joliot-Curie w Paryżu ogłosili, że naświetlając beryl cząstkami α zaobserwowali bardzo przenikliwe promieniowanie, które było w stanie wybijać protony z parafiny. Uznali, że jest to promieniowanie γ o dużej energii, które wywołuje efekt Comptona.
- 17 lutego 1932 - James Chadwick (Cambridge), który nie uwierzył w interpretację Francuzów szybko powtórzył eksperyment. W pracy „Possible existence of a neutron” proponuje, że zachodzi reakcja: $\alpha + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C} + n$
- 22 lutego 1932 - Joliot-Curies publikują jeszcze poprawkę, utrzymując hipotezę kwantów γ , ale sugerując, że obserwują nowy rodzaj oddziaływania między promieniowaniem a materią.

- 1934 - naświetlanie różnych materiałów cząstkami α przez małżonków Joliot-Curie doprowadza ich do innego odkrycia - promieniotwórczości β^+ :



Źródłem cząstek α była duża próbka polonu, którą wytworzyła Maria Curie.



James Chadwick (1891-1974)



Irena Joliot-Curie (1897-1956)



Frederic Joliot-Curie (1900-1958)

Nagroda Nobla z fizyki, 1935:

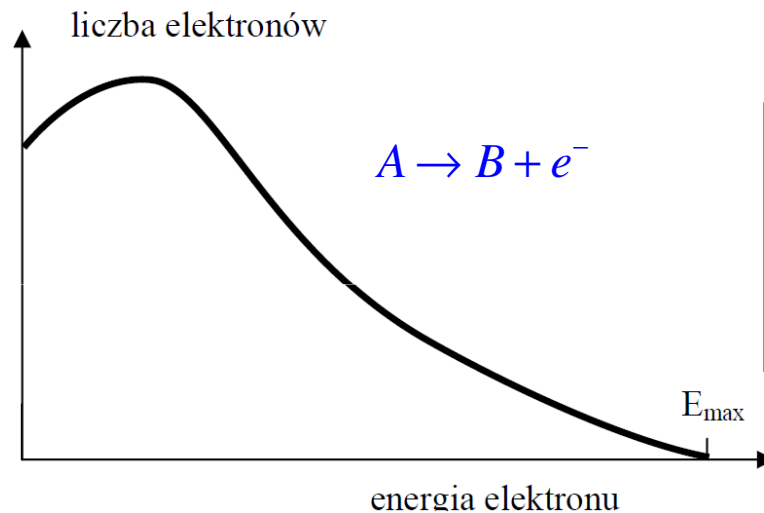
„za odkrycie neutronu”

Nagroda Nobla z chemii, 1935:

„za syntezę nowych pierwiastków promieniotwórczych”

Neutrino

- Wczesne badania jądrowych przemian β ujawniły, że w procesie tym z jądra atomowego emitowany jest elektron. Ok. 1930 ujawnił się poważny problem. Stwierdzono, że energetyczne widmo emitowanych elektronów jest ciągłe!



➔ Jeśli powstają tylko dwie cząstki, to zasady zachowania energii i pędu wymagają, aby energia elektronu była ściśle określona!

- ➔ Niels Bohr rozważał odrzucenie prawa zachowania energii. Miało ono nie obowiązywać ściśle w zjawiskach mikroświata.
- ➔ Wolfgang Pauli zaproponował radykalne rozwiązanie: w procesie emitowana jest jeszcze jedna cząstka, bardzo lekka i niewidoczna!



Wolfgang Pauli (1900-1958)

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse.- Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

- Dla postulowanej cząstki Pauli zaproponował nazwę „neutron”.
Nazwę tę nadano jednak neutralnemu partnerowi protonu w jądrze (1932).
Fermi, który w 1933 roku opracował teorię przemiany β , użył nazwy „neutrino”
 - ➔ W dzisiejszym zapisie $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$
- ➔ Początkowo nikt, łącznie z Paulim, nie wierzył w możliwość rejestracji neutrin.
Pauli zaoferował nawet skrzynkę szampana tym, którzy tego dokonają.

Akcelerator

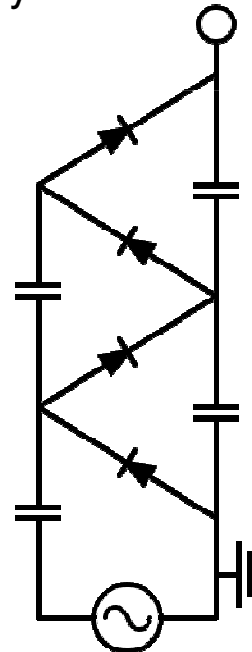
- Strukturę materii badano dotąd wykorzystując tylko naturalne źródła cząstek. Konstrukcja urządzeń, które przyspieszają cząstki i pozwalają wytwarzać wiązki cząstek o kontrolowanych parametrach (w tym energii) niezwykle rozszerzyło możliwości badań i wywołało lawinowy rozwój fizyki subatomowej.

W 1932 roku J. Cockcroft i E. Walton uruchomili w Cambridge pierwszy „generator kaskadowy” i jako pierwsi „rozbili atom” protonami o energii 700 keV:



Dostali za to **nagrodę Nobla w 1951**

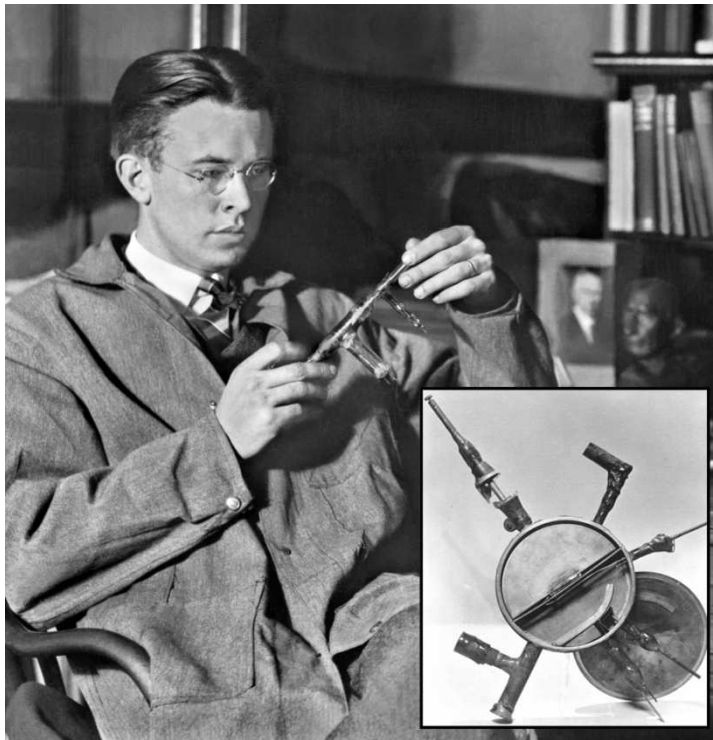
W generatorze Cockcrofta-Waltona, wysokie napięcie stałe uzyskuje się napięcia przemiennego i układu diod i kondensatorów (powielacz napięcia).



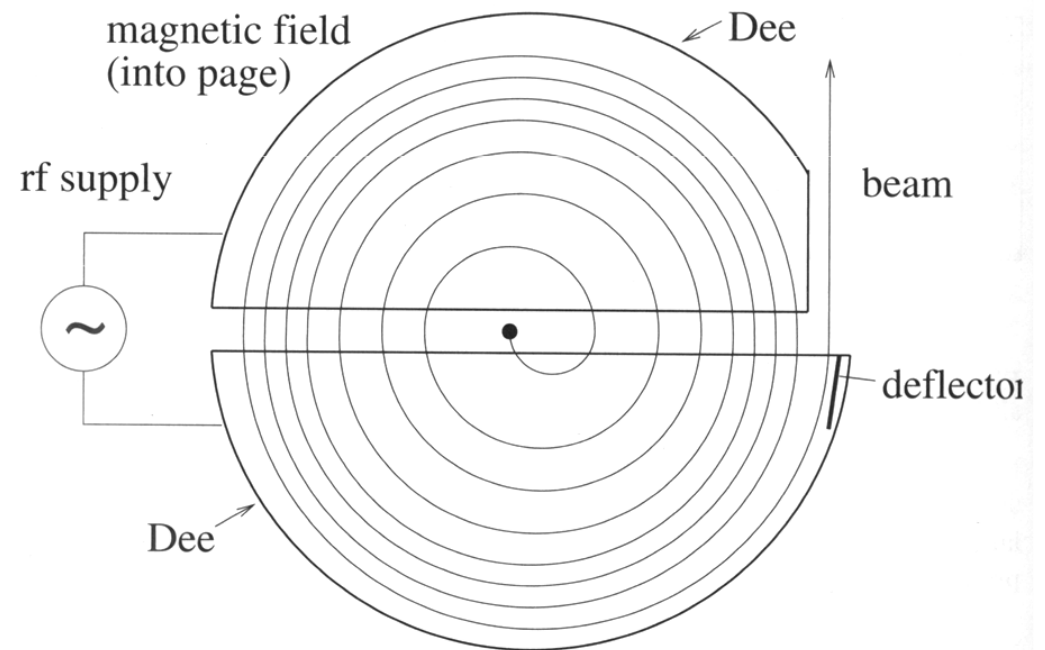
Cyklotron

Genialny pomysł Lawrence'a: do wielokrotnego przyspieszania wystarczą tylko dwie elektrody i pole magnetyczne, które „zawraca” cząstki.

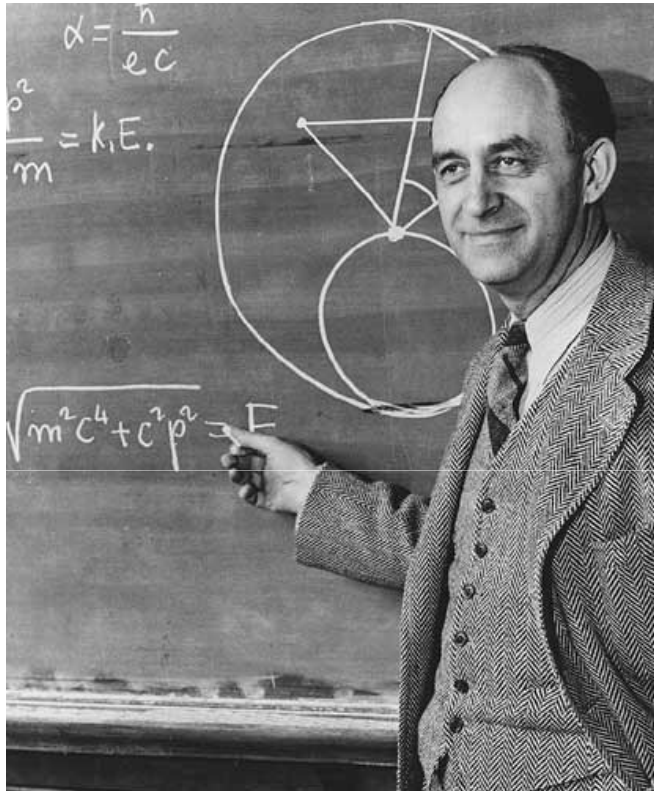
Pierwsza wersja w 1930 r. **Nagroda Nobla w 1939.**



Ernest Lawrence (1901-1958)



Enrico Fermi



Enrico Fermi (1901-1954)

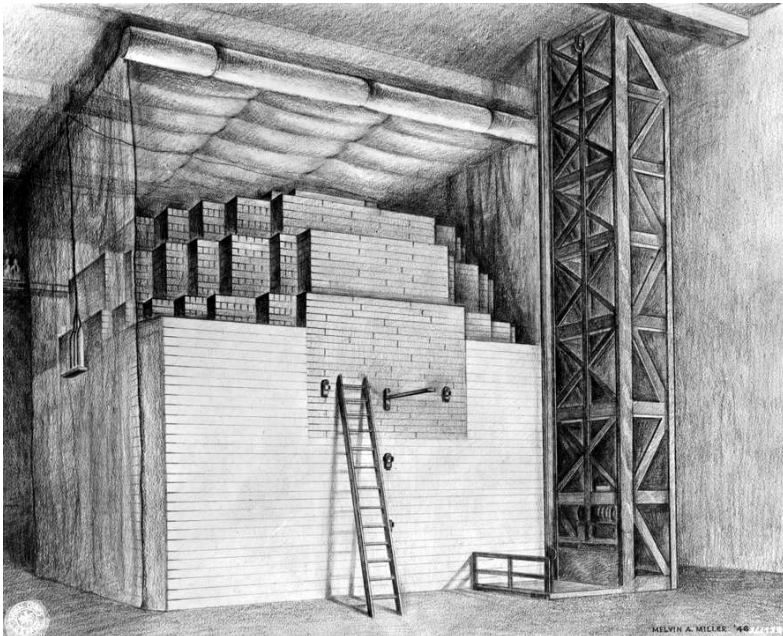
- W 1926 roku Fermi opracował kwantową statystykę cząstek o spinie połówkowym
- ➔ fermiony, statystyka Fermiego-Diraca, gaz Fermiego
- W 1933 roku stworzył nowoczesną teorię jądrowej przemiany β , dając początek kwantowej teorii pola.
(Praca początkowo odrzucona przez Nature „because it contained speculations too remote from reality to be of interest to the reader” !)
- W 1934 rozwinął w Rzymie program doświadczalny naświetlania różnych substancji neutronami.
Odkrył potrzebę moderacji (spowalniania) neutronów i wytworzył wiele nowych izotopów promieniotwórczych.
Przypuszczał też, że wytworzył nowe pierwiastki transuranowe.
Za prace te dostał **nagrodę Nobla w 1938** roku.

Rozszczepienie uranu

- Tymczasem w Berlinie Otto Hahn i Fritz Strassman także naświetlali uran neutronami. W 1938 roku ze zdziwieniem odkryli w produktach reakcji bar.
- Lise Meitner i Otto Frisch zrozumieli, że neutrony wywołują rozszczepienie jąder uranu.
Hahn dostał za to **nagrodę Nobla z chemii (1944)**



Otto Hahn i Lise Meitner

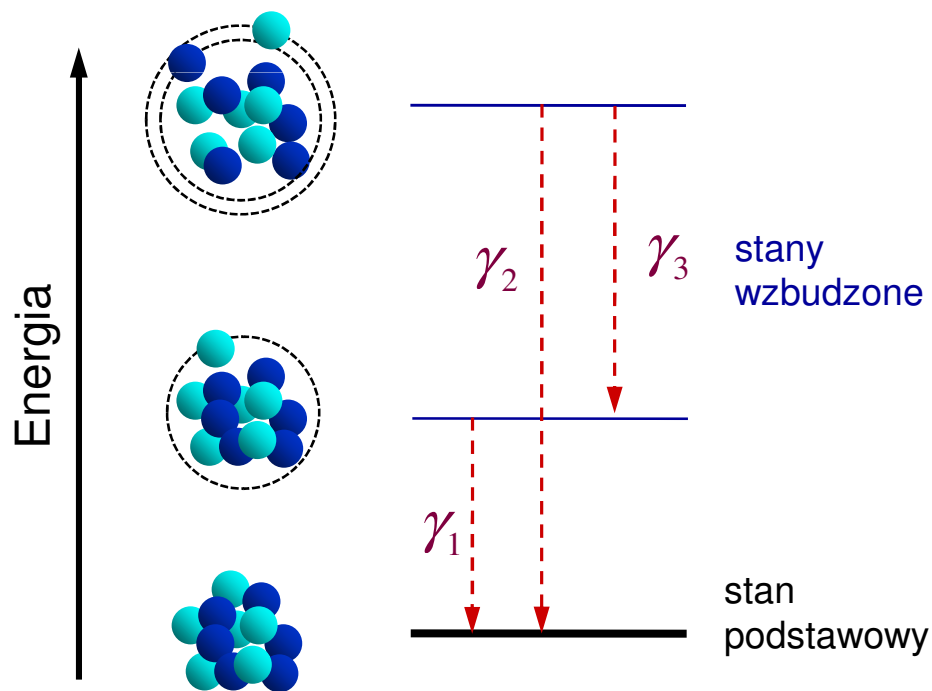


6 ton czystego uranu, 37 tony
tlenku uranu, 35 ton grafitu

- Na Uniwersytecie w Chicago Fermi zbudował pierwszy reaktor (stos) atomowy. W 1942 roku uzyskano w nim pierwszą kontrolowaną reakcję łańcuchową.

Fizyka jądrowa

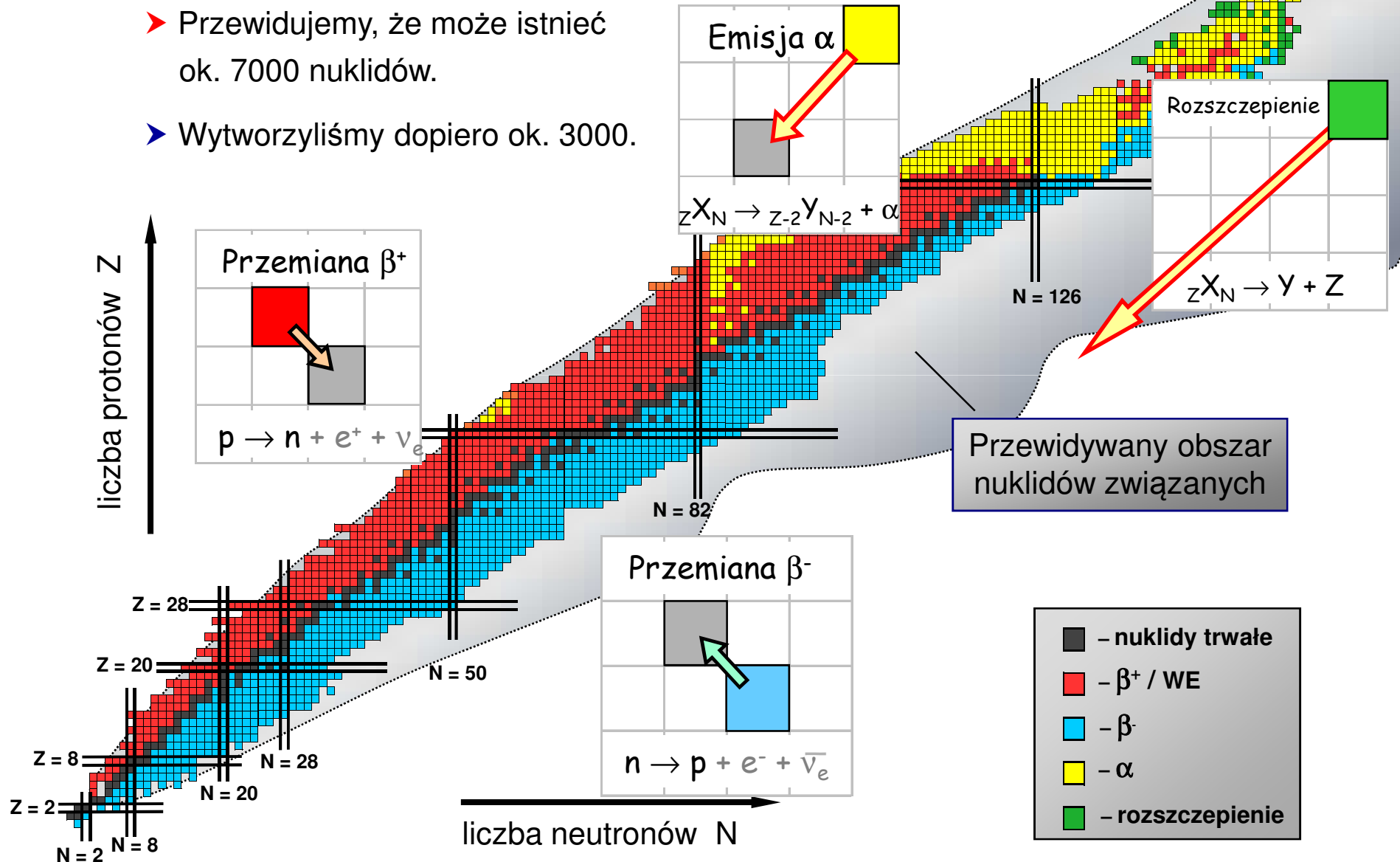
- Wielkie znaczenie zjawisk jądrowych dla gospodarki (i wojska) oraz rozwój metod akceleracji i detekcji cząstek, wywołały rozkwit badań nad jądrami atomowymi.
- ➔ Powstały wyspecjalizowane laboratoria do badania reakcji jądrowych, do wytwarzania nowych, sztucznych izotopów promieniotwórczych i do poznawania ich budowy i własności.



W **jądrze** sytuacja jest analogiczna do atomu – **protony** i **neutrony** mogą poruszać się na orbitach o różnych energiach. Przejściom między tymi stanami towarzyszy emisja promieniowania elektromagnetycznego. Jest to **promieniowanie γ** .

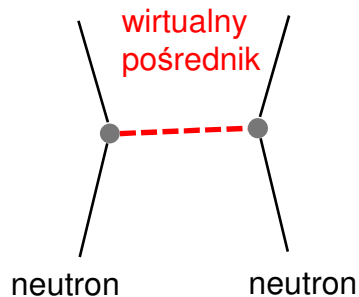
Świat nuklidów

- Przewidujemy, że może istnieć ok. 7000 nuklidów.
- Wytworzyliśmy dopiero ok. 3000.



Mezon Yukawy

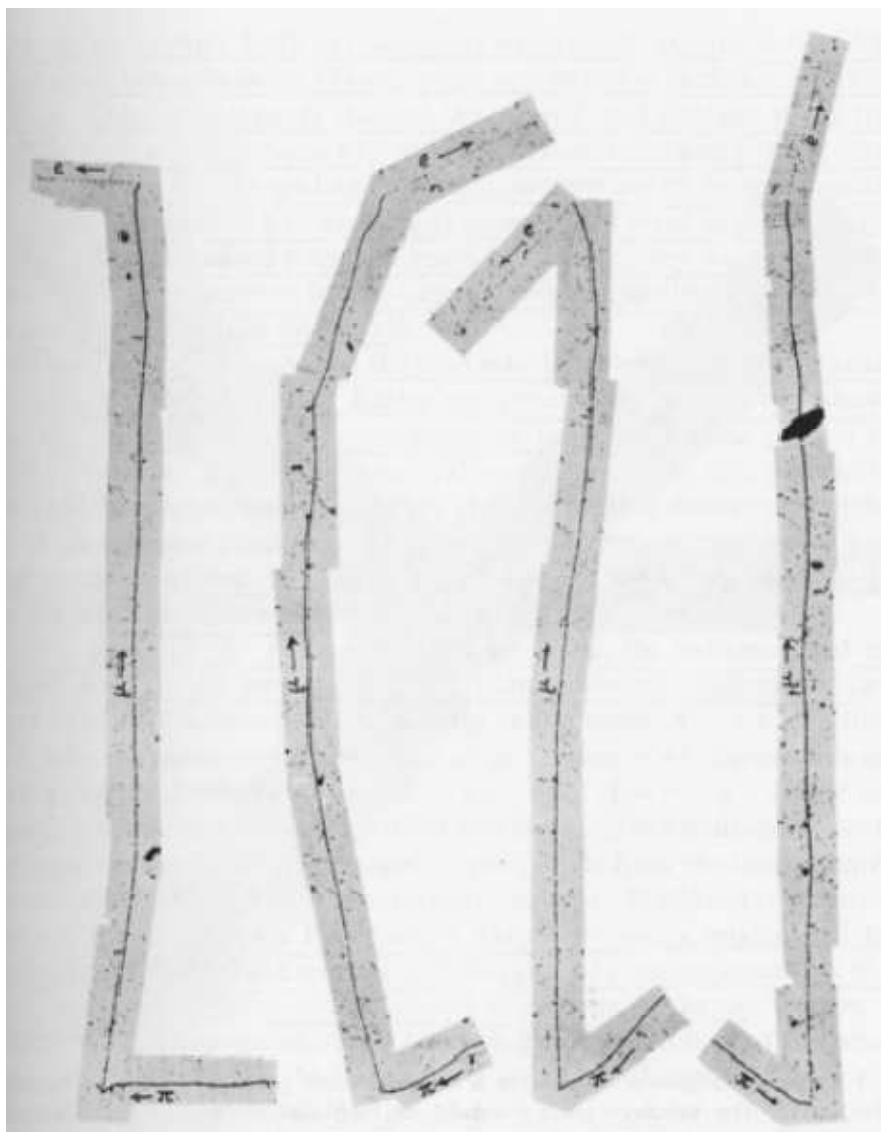
- ▶ Hideki Yukawa w 1934 roku zaproponował model oddziaływania silnego między nukleonami. Krótki zasięg tych sił ($\sim 1 \text{ fm} = 1 \times 10^{-15} \text{ m}$) związany miał być z wymianą ciężkiej cząstki (ok. $100 \text{ MeV}/c^2$) między nukleonami.



→ Taki obraz oddziaływania na poziomie podstawowym pozostał aktualny i stosuje się go do wszystkich oddziaływań. Siły elektromagnetyczne mają zasięg nieskończony, nośnik sił, foton, ma zerową masę spoczynkową.

- ▶ W 1937 roku odkryto w promieniowaniu kosmicznym nową cząstkę o szukanej masie (C.D. Anderson). Ale jej własności nie pasowały do modelu Yukawy! Dziś wiemy, że był to mion, μ , który jest cięższym „bratem” elektronu.
 - ▶ W 1947 roku C. Powell odkrył w promieniowaniu kosmicznym drugą cząstkę o podobnej masie! Okazało się, że oddziałuje ona silnie i doskonale pasuje do hipotezy Yukawy. Nazwano ją mezonem π , lub pionem.
- Obie nowe cząstki są nietrwałe: $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$

Odkrycie pionu



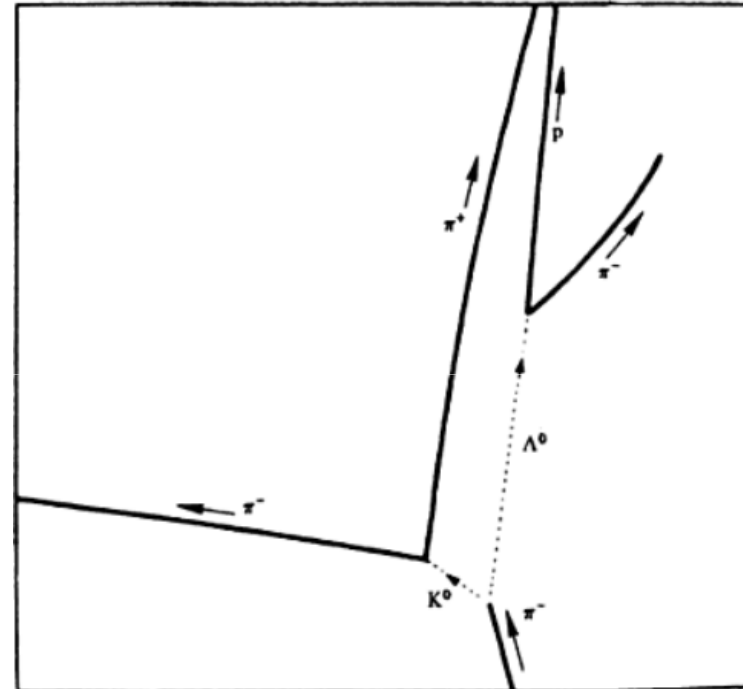
- ▶ Piony zostały odkryte przy użyciu emulsji fotograficznych, naświetlanych na dużych wysokościach (balony, szczyty gór).
- Yukawa otrzymał **nagrodę Nobla z fizyki w 1949** roku za „*teoretyczne przewidzenie istnienia mezonów*”
- Cecil Powell dostał **nagrodę Nobla z fizyki w 1950** za „*rozwój metody fotograficznej badania procesów jądrowych i za odkrycia związane z mezonami*”

Dziwne!

- W 1947 roku zaobserwowano nową cząstkę, której nikt się nie spodziewał. A wkrótce pojawiły się następne...



zdjęcie z komory pęcherzykowej



➔ Cząstki były produkowane parami, np.: $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$

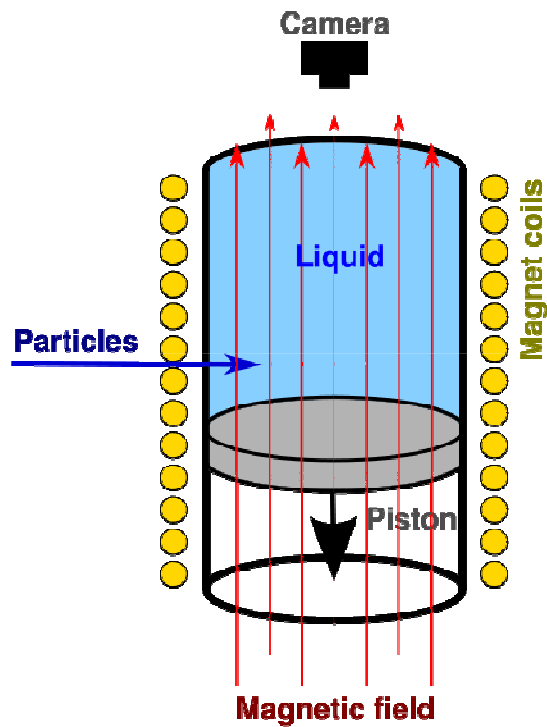
i rozpadały się po długim czasie (10^{-10} s)

$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ mezon K (kaon)

$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ hiperon Λ

Komora pęcherzykowa

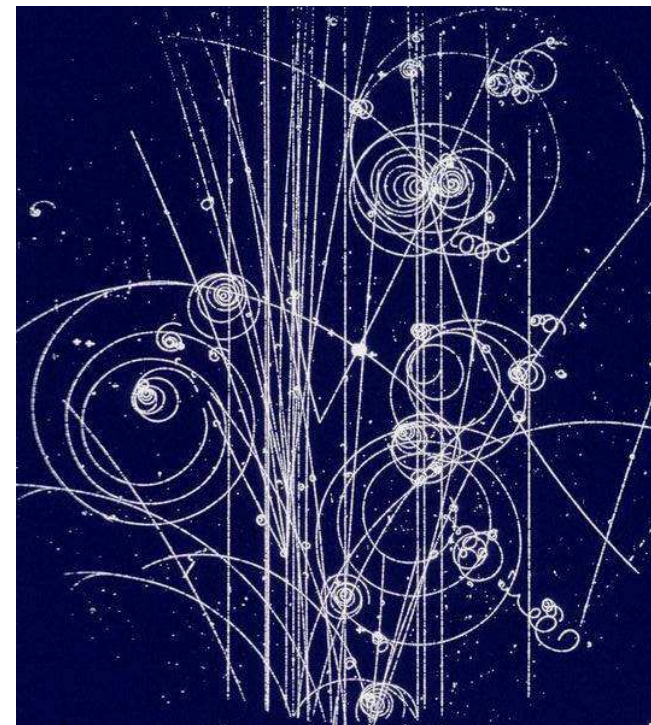
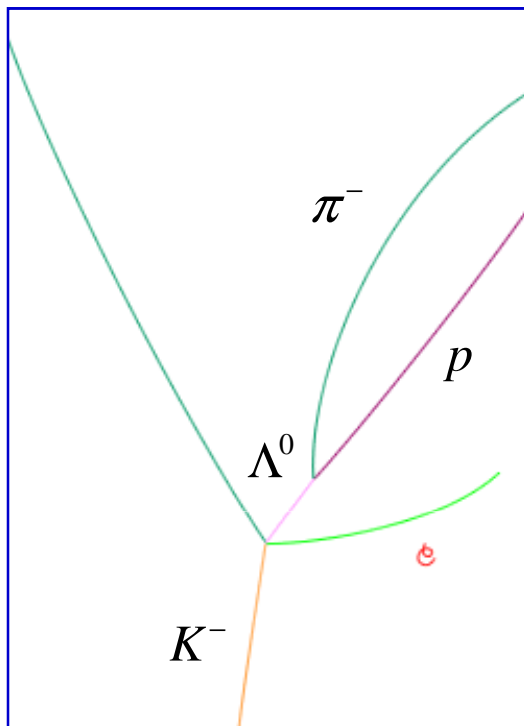
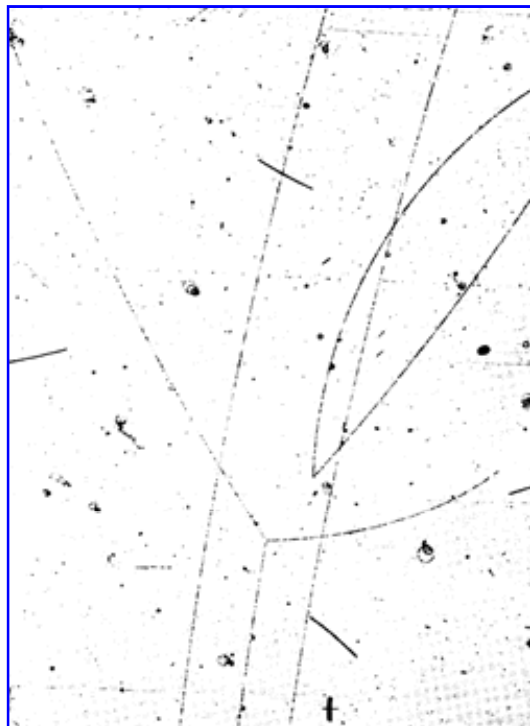
- Ogromną rolę w badaniach nowych cząstek odegrał nowy typ detektora: komora pęcherzykowa, skonstruowana przez Glasera w 1952 roku



W przegrzanej cieczy pęcherzyki pary tworzą się wokół jonów powstałych wzdłuż toru cząstki naładowanej.



Big European Bubble Chamber (CERN)



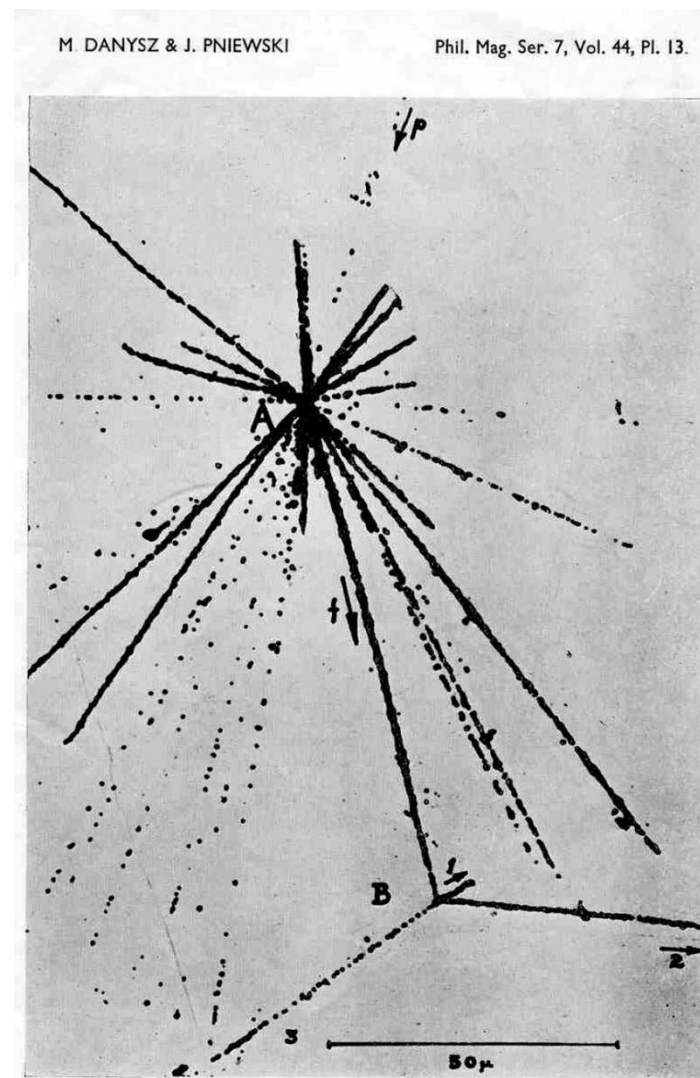
Produkcja i rozpad hiperonu Λ w reakcji $K^- + p$ (CERN)

- Donald D. Glaser – nagroda Nobla 1960
- Emilio Segre, Owen Chamberlain – odkrycie antyprotonu, nagroda Nobla 1959
- Luis W. Alvarez – odkrycie wielu nowych cząstek, nagroda Nobla 1968

Hiperjądra

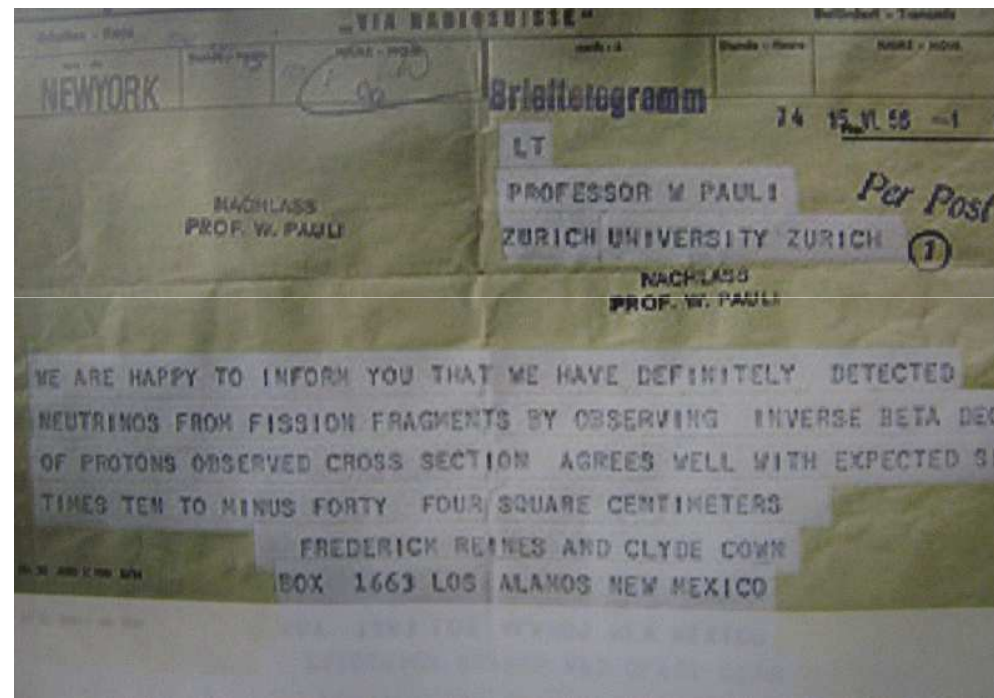


Odkrycie hiperjądra w emulsji fotograficznej
Marian Danysz i Jerzy Pniewski, 1952



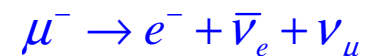
f – fragment jądra z hiperonem Λ

- Frederick Reines i Clyde Cowan ustawili wielki detektor w pobliżu reaktora, który jest źródłem silnego strumienia (anty)neutrin. W 1956 roku ogłosili obserwację reakcji $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$
- ➔ Reines otrzymał za to **nagrodę Nobla w 1995** (Cowan zmarł wcześniej)

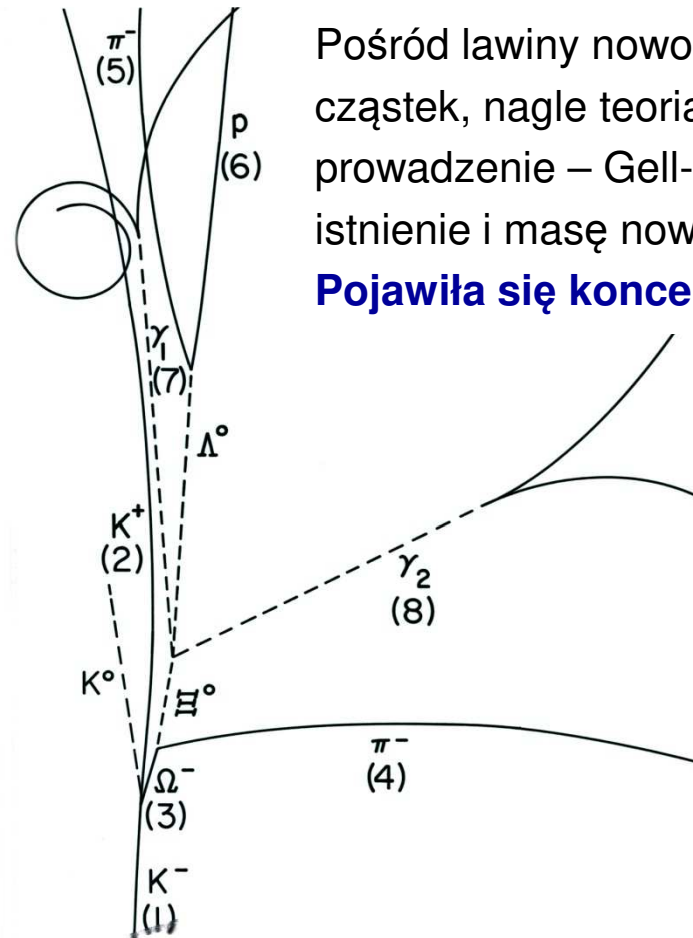
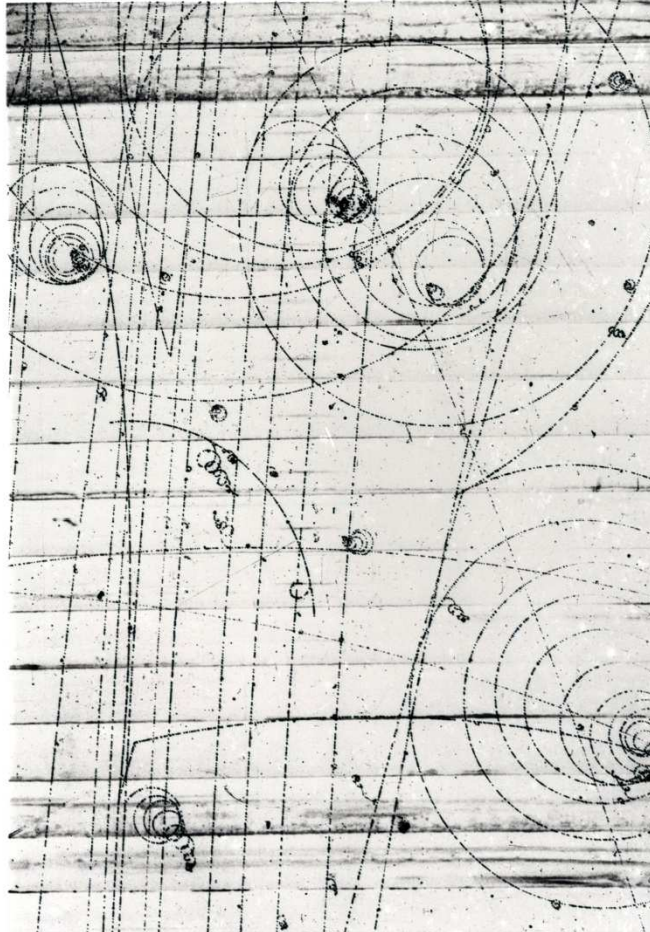


- W 1962 roku L. Lederman, M. Schwarz i J. Steinberger odkryli, że istnieje też drugie neutrino związane z mionem, różne od neutrina elektronowego.

Dostali za to **nagrodę Nobla w 1988**



Triumf teorii

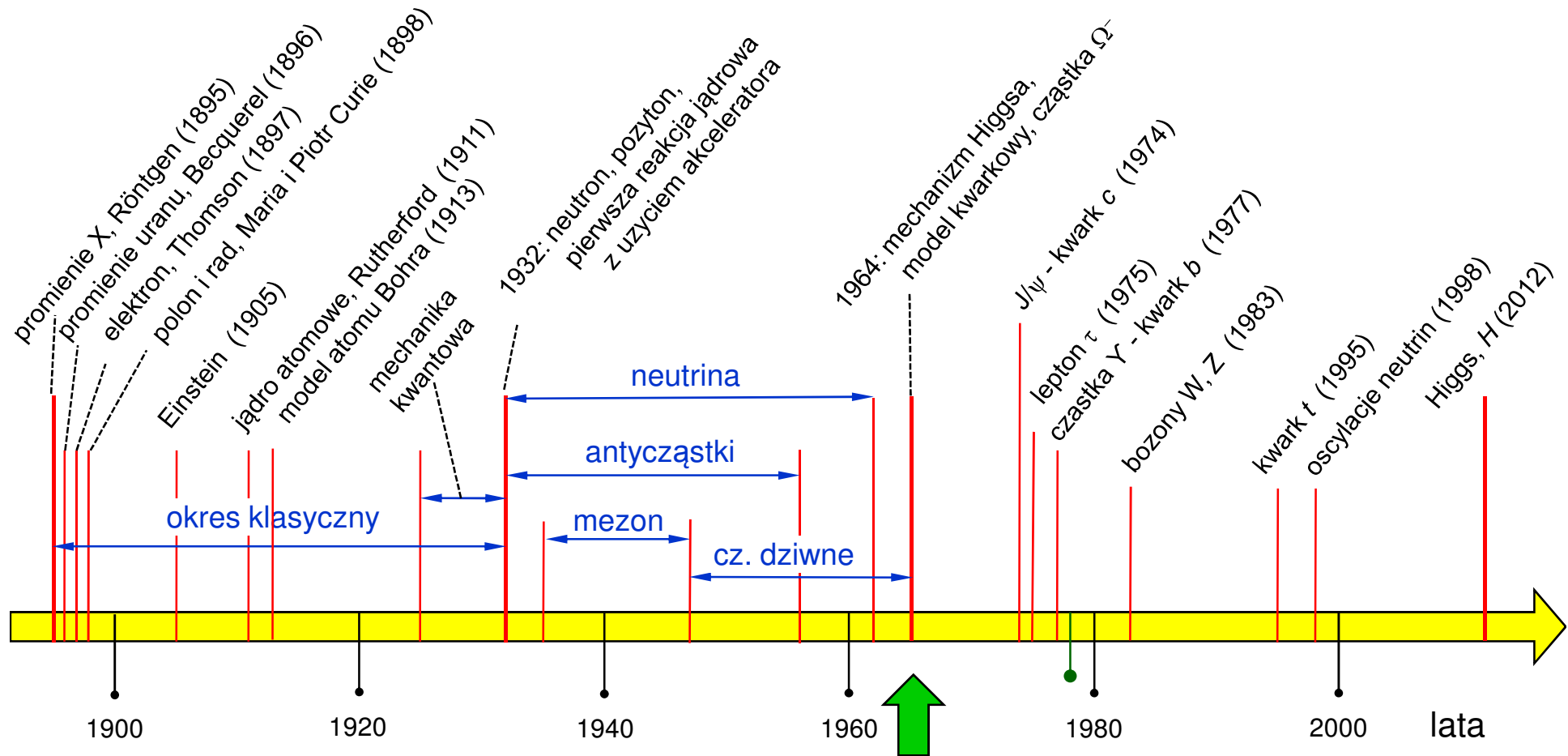


Pośród lawiny nowo odkrywanych cząstek, nagle teoria wyszła na prowadzenie – Gell-Mann przewidział istnienie i masę nowej cząstki dziwnej. **Pojawiła się koncepcja kwarków.**

Odkrycie Ω^- w Brookhaven national Laboratory, 1964

- Murray Gell-Mann – **nagroda Nobla 1969** za „odkrycia dotyczące klasyfikacji cząstek elementarnych i ich oddziaływań”

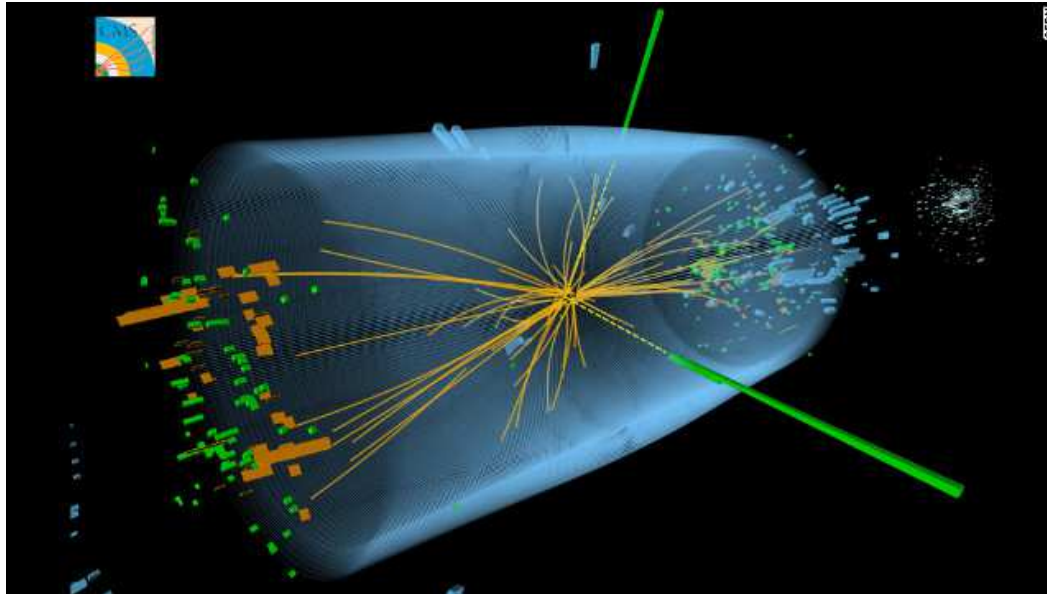
Ostatnie 120 lat



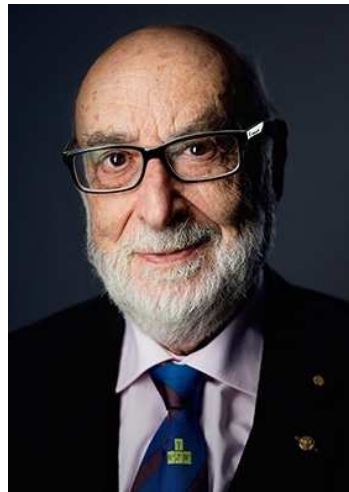
Wielkie zwieńczenie...

- W listopadzie 2009 w ośrodku CERN pod Genewą rozpoczął działanie Wielki Zderzacz Hadronów (LHC), największy na świecie akcelerator cząstek, realizując największe naukowe przedsięwzięcie w historii.



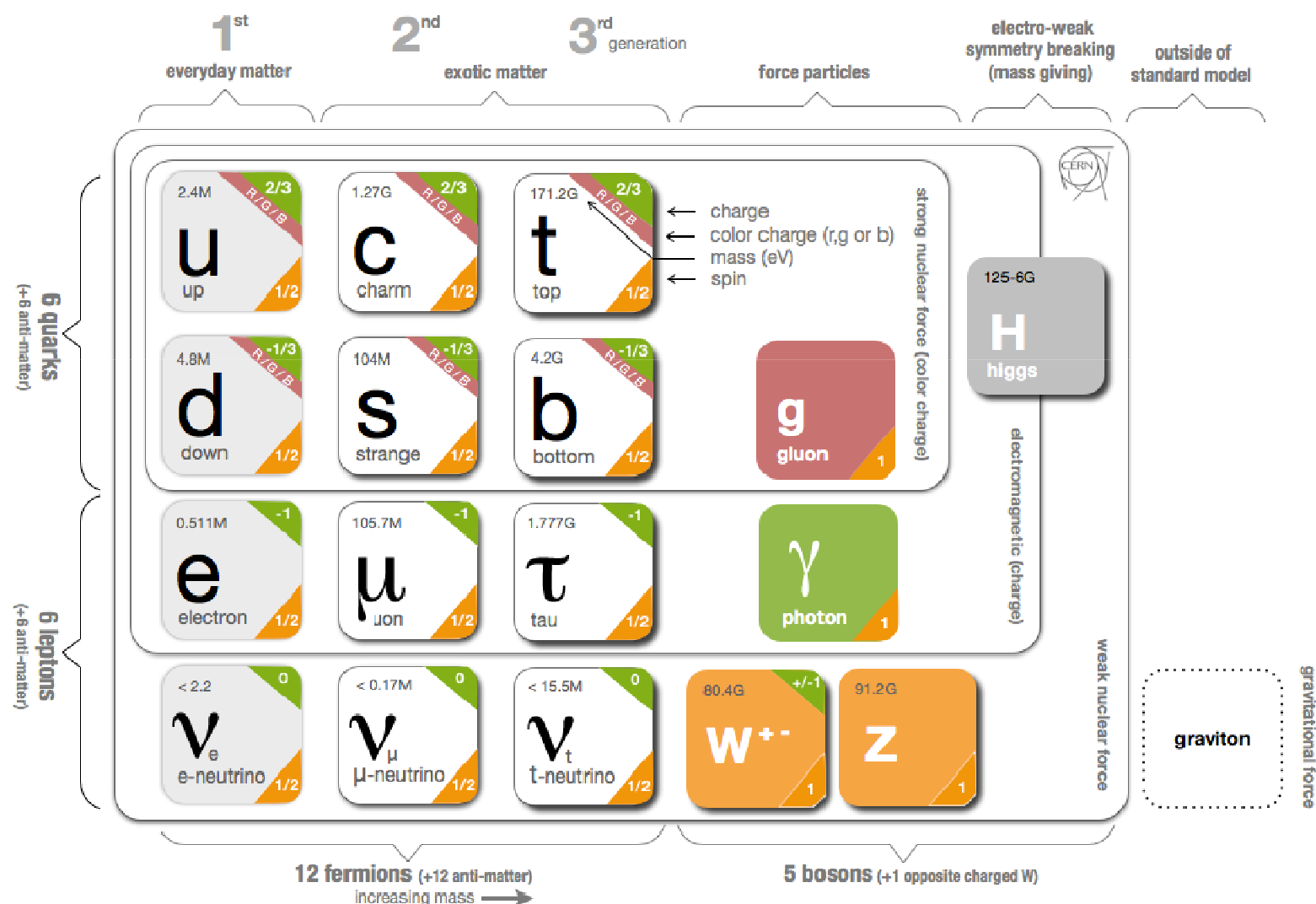


- 2012 – odkrycie bozonu Higgsa w CERN, ostatni brakujący element MS
Francois Englert, Peter W. Higgs – nagroda Nobla 2013



Elementarne składniki znanej materii

Model Standardowy



...i nowy początek

- Fizyka subatomowa daje nam wgląd w budowę materii i w historię jej ewolucji od Wielkiego Wybuchu do dziś. Pozwala zrozumieć jak powstały składniki i warunki niezbędne do powstania życia. Badając mikroświat poznajemy, paradoksalnie, przeszłość i przyszłość Wszechświata jako całości.
- Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych jest zamkniętą i spójną konstrukcją. Jest to wielkie i piękno dzieło ludzkiego intelektu, jedna z najdokładniejszych i najskuteczniejszych teorii w historii nauki.

Tak wiele ważnych pytań wciąż czeka na odpowiedź, że to dopiero początek...



Polecane książki

Richard Rhodes „*Jak powstała bomba atomowa*”, Prószyński i S-ka, 2000

Frank Close „*Zagadka nieskończoności. Kwantowa teoria pola.
Na tropach porządku Wszechświata.*”, Prószyński i S-ka, 2013

Susan Quinn „*Życie Marii Curie*”, Prószyński i S-ka, 1997

Abraham Pais „*Czas Nielsa Bohra*”, Prószyński i S-ka, 2006