

FIZYKA CZĄSTEK

od starożytnych do modelu
standardowego i dalej

Krzysztof Fiałkowski, IFUJ

Plan wykładów

- Krótka historia fizyki cząstek: prehistoria, źródła naturalne i akceleratory, leptony i hadrony, model kwarków, unifikacja GSW, QCD i kompletny model standardowy
- Droga odkryć na przykładzie neutrin: reaktory, Słońce, akceleratory, detektory, masy neutrin, oscylacje, neutrino Majorany
- Podsumowanie i perspektywy: nagrody Nobla, lista cząstek, brakujące ogniwa

Czy istnieją cząstki elementarne?

- Demokryt (via Lukrecjusz): istnieje granica możliwości podziału materii, czyli cząstki niepodzielne (ατομος).
- Arystoteles: to niemożliwe, bo pomiędzy atomami byłaby próżnia, a na to natura nie pozwala.
- Dziś niby zgadzamy się z Demokrytem, ale TAK NAPRAWDĘ próżnia to nie próżnia, więc?

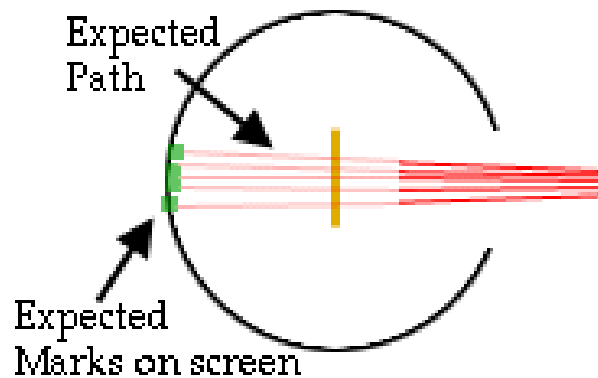
Atomy XIX wieku

- Dalton: atomy tłumaczą stałe proporcje pierwiastków w związkach chemicznych (z dokładnością do stałych wymiernych).
- Boltzmann: termodynamika jako fizyka statystyczna cząsteczek/atomów.
- Einstein, Smoluchowski: ruchy Browna jako skutki uderzeń atomów w widzialne cząstki zawiesiny, pyłki itp..

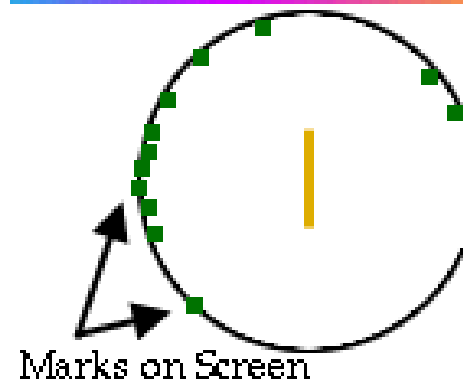
Budowa atomu

- Thomson: 1897 elektrony, 1904 model atomu „ciasta z rodzynkami”.
- 1896 Becquerel, 1900 Villard: radioaktywność α , β , γ (zmiennosc atomów).
- '11 Rutherford: jądro dla wytłumaczenia rozpraszania cząstek α do tyłu, proton – jądro atomu wodoru.

The Predicted Result:



The Result



Wstawka: jak badać mikrostrukturę?

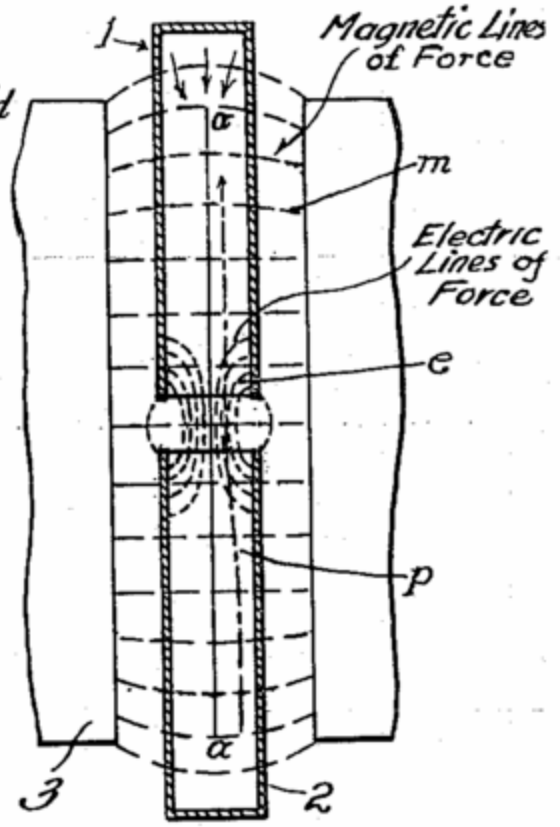
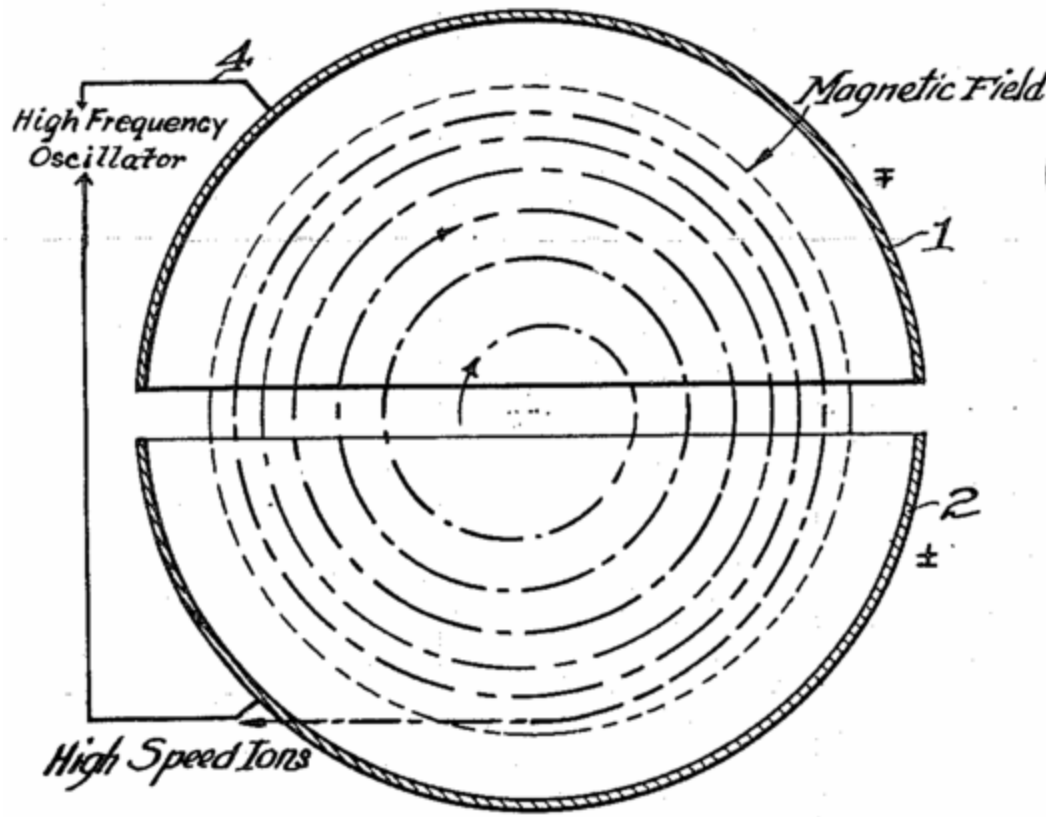
- Naiwnie: a) zobaczyć, b) rozłożyć na części.
- Fizycznie: a) zbadać rozproszenie fali, b) dostarczyć energię $>$ energii wiązania.
- Granice możliwości w zapisie kwantowym:
a) $\lambda \ll R$ (światło), $Q^2 > \hbar^2/R^2 \rightarrow E > \hbar c/R$ (cząstki, to samo wg. de Broglie'a),
b) $\Delta E \geq \hbar c/R$ (Heisenberg: znów to samo).
- Zatem: do badania mikroświata konieczne wielkie energie!
- Skala: $\hbar c \approx 0.2 \text{ GeV} \cdot \text{fm}$, więc $0.1 \text{ nm} \leftrightarrow 1 \text{ keV}$ (atom)
 $10 \text{ fm} \leftrightarrow 10 \text{ MeV}$ (jądro); będzie dalej!

Budowa atomu II

- Model Bohra atomu: „orbity” elektronów wokół jądra, ale bez promieniowania (wbrew fizyce klasycznej!).
- '30 Pauli: hipoteza neutrina dla ocalenia praw zachowania energii i momentu pędu w rozpadzie β .
- Fermi: teoria rozpadu β , słabe oddziaływania: zerowy zasięg – nieskończona masa bozonu?
- '32 Anderson: pozyton (antycząstka elektronu).
- '32 Chadwick: neutron ($\alpha + \text{Be} = n + \text{C}$; Joliot-Curie).
- Heisenberg (Majorana, Iwanienko): jądra -układy protonów i neutronów – „nukleonów”, izospin.

Początki fizyki cząstek

- Uwaga: dotąd wystarczały cząstki α z rozpadów (kilka MeV), wyższe energie z promieniowania kosmicznego (a właściwie produktów zderzeń z atomami atmosfery). Od '32 akceleratory (Cockroft, Walton liniowy, Lawrence cykliczny).
- '35 Yukawa: teoria mezonowa dla wyjaśnienia skończonego zasięgu R sił jądrowych, a stąd np. stałej gęstości materii jądrowej.
- '37 Anderson: mion, mezon? Nie! Kto zamawiał?
- '47 Powell: odkrycie mezonu π , $m_\pi = \hbar/cR$; $\pi \rightarrow \mu \nu$.



Niespodzianki powojenne

- '47 Rochester, Butler: „cząstki V” w emulsji.
- '52 Danysz, Pniewski: hiperjądra.
- '52 Fermi: nowe hadrony (silnie oddziałujące), krótkożyjące („rezonanse”), $\Delta E \approx 100 \text{ MeV}$.
- '55 Lee-Yang: teoria niezachowania parzystości w rozpadzie β ; Wu: potwierdzenie eksp.; neutrino o zerowej masie?
- '55 Gell-Mann: dziwność S, prawo zachowania: cząstki dziwne tworzone parami w o. silnych, rozpad wolny przez o. słabe, bez zachowania S.
- '56 Reines i Cowan: oddziaływanie neutrin.

Nowe akceleratory

- Cyklotron pozwalał na nadanie $E_k \ll mc^2$, wtedy częstość obiegu w stałym B stała.
- Do wyższych energii konieczna zmienność pola, wygodny stały promień, niewielka objętość pola i przyspieszanie „pęczków”: synchrotron (dla e $v \approx c$, dla p zmienna).
- Dziś praktycznie cykliczne i liniowe mają te same elementy przyspieszające, MeV/m (może będzie GeV/m?), ale w cyklicznych strata na promieniowanie – granica 100GeV dla e , 20TeV dla p . Zderzające się wiązki!



Dalsze kłopoty i próby porządkowania

- '61 Glashow: oddziaływania słabe jak elektromagnetyczne z nowymi bozonami?
- '62 Lederman, Schwartz, Steinberger i inni: dwa neutrino.
- '64 Cronin i Fitch: niezachowanie CP.
- '64 Gell-Mann i Zweig: model kwarkowy (u,d,s) hadronów.
- Nieudane próby odkrycia kwarków – uwięzienie?
- '67 Salam, Weinberg: pełna teoria „GSW” oddziaływań „elektrosłabych”.

Rewolucja lat 70-tych

- '70 Glashow, Iliopoulos, Maiani: dla słabych o. konieczny czwarty kwark.
- '73 Gross, Wilczek, Politzer: asymptotyczna swoboda silnych o.: kwarki uwięzione, ale im bliżej, tym słabiej oddziałują.
- '74 Richter/Ting: odkrycie cząstki J/ψ , świat 4 kwarków (u, d, s, c) i 4 leptonów (e, ν_e, μ, ν_μ).
- '75 Perl: odkrycie leptonu τ .
- '77 Lederman: cząstka Υ - piąty kwark b.

„Kompletny” model standardowy

- '83 UA1, UA2 (CERN collider): odkrycie bozonów W , Z $m \approx 100m_p$ (Nobel: Rubbia - collider, van der Meer - ogniskowanie).
- '90 LEP (bilans rozpadów Z): tylko 3 neutrina.
- '95 CDF, D0: odkrycie szóstego kwarku t w zderzeniach pp (rozpady na Wb).
- '98 niespodzianka: neutrina mają masę!

Jak się tego dowiedzieliśmy?

Przykład: neutrino

- Przypomnienie: hipoteza neutrina Pauli '30
- Przesłanki:
 - a) w rozpadzie β widmo energii elektronu ciągłe od 0 do E_{\max} (dla α , γ dyskretne)
 - b) jądra przed- i po rozpadzie oba spin całkowity (w \hbar), albo oba połówkowy
- Niezachowanie energii i momentu pędu?
- List Pauli'ego