

# Jak się tego dowiedzieliśmy?

## Przykład: neutrino

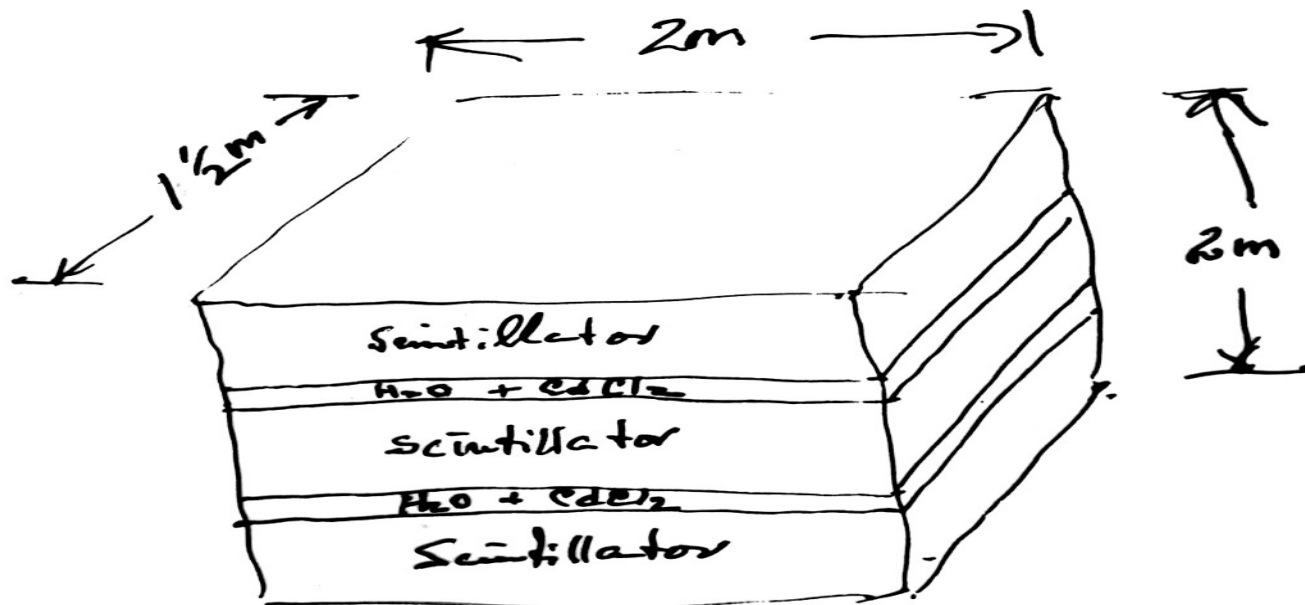
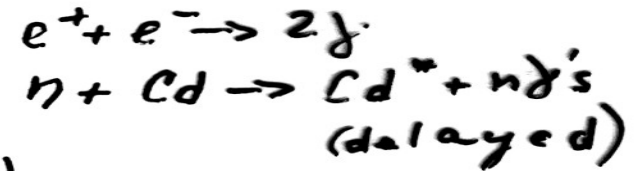
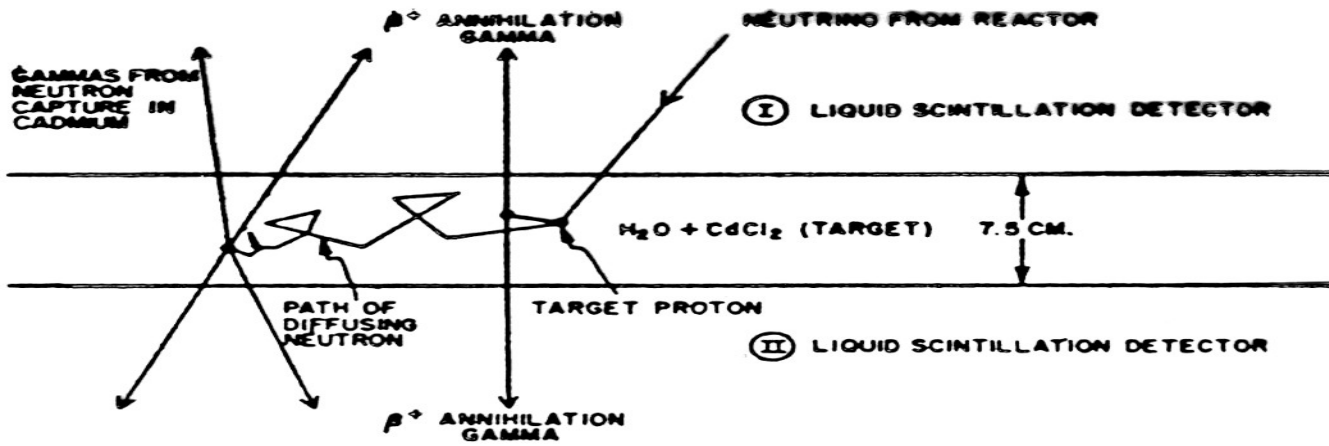
- Przypomnienie: hipoteza neutrina Pauli '30
- Przesłanki:
  - a) w rozpadzie  $\beta$  widmo energii elektronu ciągłe od 0 do  $E_{\max}$  (dla  $\alpha$ ,  $\gamma$  dyskretne)
  - b) jądra przed- i po rozpadzie oba spin całkowity (w  $\hbar$ ), albo oba połówkowy
- Niezachowanie energii i momentu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

# Dalsza historia neutrin

- Przypomnienie: Reines (Nobel '95) i Cowan rejestrowali produkty reakcji  $\nu p \rightarrow e^+ n$  (pozyton przez anihilację na 2  $\gamma$ , neutron przez wychwyt w kadmie i emisję kilku  $\gamma$  z wzbudzonego jądra)
- Rejestracja neutrin to zawsze rejestracja produktów oddziaływania  $\nu$  z materią!
- Skoro tylko znikomy ułamek (rzędu  $10^{-12}$ ) oddziałuje, potrzebne potężne strumienie! Reines-Cowan z reaktora. Skąd jeszcze?

(At Savannah River Tritium production Reactor)

NATURE September 1, 1956 VOL. 176



# Neutrino słoneczne

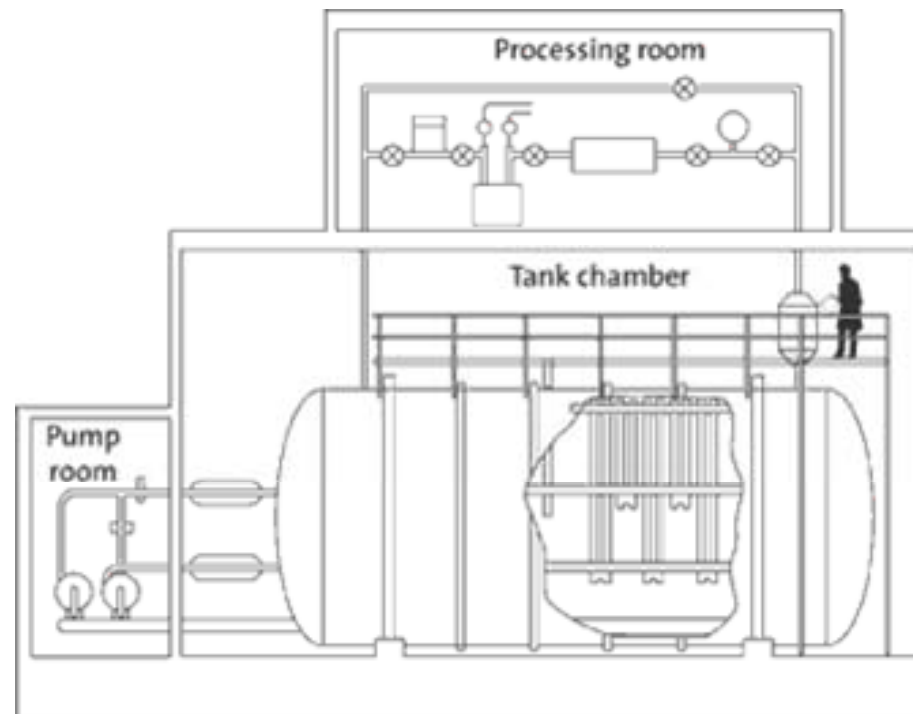
- W latach '30 XX wieku fizycy (Hans Bethe i inni) ustalili źródła energii słońca:
- reakcje fuzji jąder wodoru w jądra helu  
 $p+p \rightarrow d+e^++\nu$ ;  $p+d \rightarrow {}^3\text{He}+\gamma$ ;  ${}^3\text{He}+{}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He}+2p+\gamma$ , w sumie  $6p \rightarrow {}^4\text{He}+2\nu+2p+2e^++3\gamma$ .  
Pozytony anihilują, kwanty  $\gamma$ , protony i jądra helu oddają swoją energię kinetyczną otoczeniu zwiększając jego temperaturę, neutrino uciekają.
- Te neutrino mają energię poniżej energii spoczynkowej  $e$ , trudno je rejestrować, ale są i neutrino z innych reakcji, o wyższej energii.
- Ile neutrino dolatuje do nas ze Słońca?

# Strumień neutrin słonecznych

- Ze strumienia energii elektromagnetycznej ze Słońca na Ziemi i odległości Ziemia-Słońce obliczono „moc Słońca”:  $4 \cdot 10^{26}$  W, a stąd liczbę neutrin emitowanych przez Słońce:  $5 \cdot 10^{38}$ /s i strumień neutrin na Ziemi:  $6 \cdot 10^{10}$ /s/cm<sup>2</sup>. To jest porównywalne ze strumieniem w pobliżu reaktorów!
- Davis: eksperyment detekcji tych neutrin z reakcji  $\nu + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$  (tylko dla  $E > 0.8 \text{ MeV}$ , więc mały ułamek neutrin, ale i tak mnóstwo)

# Eksperyment Davisa (Nobel '02)

- Aparatura: zbiornik 615 t  $C_2Cl_4$  (środek czyszczący) w starej kopalni złota Homestake (Dakota S) 1500m pod ziemią
- Co 2 miesiące argon wyplukiwany helem ze zbiornika, mierzona liczba jego atomów przez rozpady  $\beta$
- W latach 1970-94 zarejestrowano 875 rozpadów, stąd oszacowano 2200 reakcji: 3 razy mniej, niż przewidywała teoria!!!

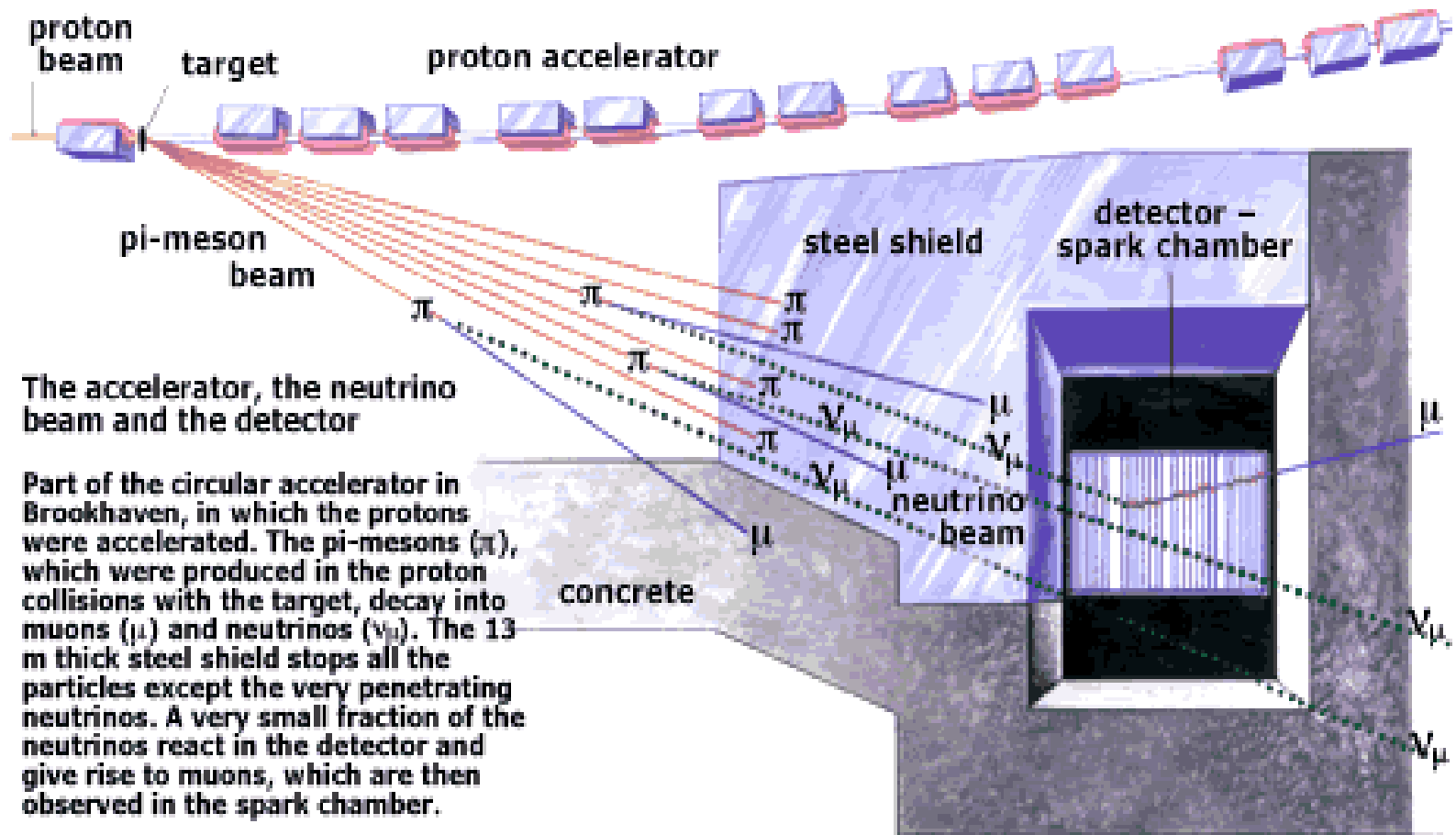


Schemat eksperymentu Davisa

# Antrakt: różne neutrino

- W rozpadzie  $\pi \rightarrow \mu \nu$  „ginie” połowa energii unoszona najwyraźniej przez neutrino, ale czy to neutrino „mionowe” tożsame z  $\nu$  z rozpadu  $\beta$ ?
- Lederman, Schwartz, Steinberger (Nobel’88): wiązka pionów ze zderzeń protonów z tarczą formowana, po czasie  $>$  czasu rozpadu kierowana przez osłonę (wiele metrów stali z rozbieranego pancernika) do detektorów „kanapek”: warstwy materii i scyntylatora.
- Wynik: produkowane są miony, a nie elektrony!
- Dziś wiemy, że jest i trzecie neutrino „taonowe”.





**The accelerator, the neutrino beam and the detector**

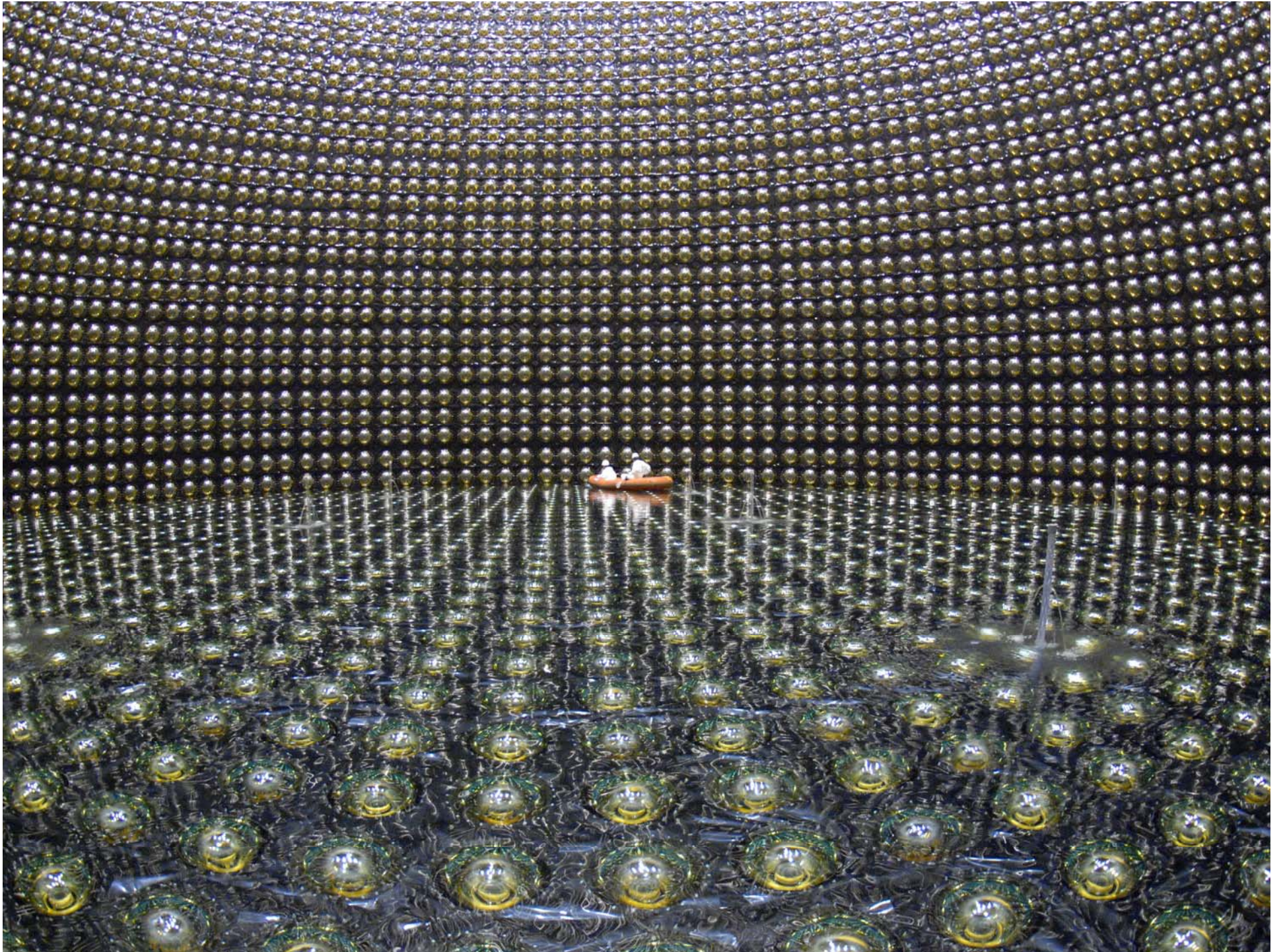
Part of the circular accelerator in Brookhaven, in which the protons were accelerated. The pi-mesons ( $\pi$ ), which were produced in the proton collisions with the target, decay into muons ( $\mu$ ) and neutrinos ( $\nu_\mu$ ). The 13 m thick steel shield stops all the particles except the very penetrating neutrinos. A very small fraction of the neutrinos react in the detector and give rise to muons, which are then observed in the spark chamber.

Based on a drawing in *Scientific American*, March 1963.

# Inne eksperymenty

- Dalsze radiochemiczne: GALLEX, SAGE z użyciem  $^{71}\text{Ga} \rightarrow ^{71}\text{Ge}$  (już dla  $E > 0.2\text{MeV}$ ) – nadal mniej neutrin, niż z teorii (ok.  $\frac{1}{2}$ ).
- Inna technika: pomiar „na bieżąco” przez rejestrację elektronu/mionu, w który zmienia się neutrino oddziałując z nukleonami materii. Nadal deficyt neutrin słonecznych!
- Najwygodniej gdy tarcza=detektor: zbiorniki wodne, w których wytworzone  $e/\mu$  wysyłają promieniowanie Czerenkowa (odpowiednik naddźwiękowego grzmotu dla  $v > c/n$ ). Dziś największy: Superkamiokande (50 kt!).







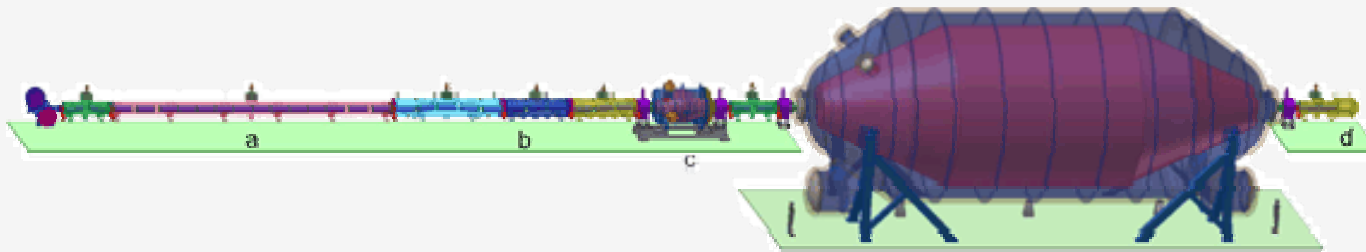
# Neutrino z innych źródeł

- „Atmosferyczne” – z rozpadów pionów produkowanych w atmosferze przez promieniowanie kosmiczne i z rozpadów mionów z rozpadów pionów
- Odkrycie Superkamiokande (Koshiba Nobel 2003): neutrin elektronowych tyle samo „z dołu”, co „z góry”, mionowych znacznie mniej „z dołu”. Wyjaśnienie: mionowe zmieniają się po drodze w taonowe, „niewidoczne” dla SK- oscylacje.
- Podobne tłumaczenie dla neutrin słonecznych! Ale to możliwe tylko, gdy masa różna od zera!

# Dalsze badania

- Widmo energii elektronów z rozpadu  $\beta$  trytu dowodzi, że  $m_\nu < 10^{-5} m_e$ .
- Oscylacje (zamiana w locie na inny rodzaj neutrin) możliwe tylko, gdy znane neutrina to kombinacje 3 stanów o różnych masach.
- Jak to dokładniej zbadać?
- Dokładniejszy pomiar rozpadu  $\beta$  trytu (KATRIN).
- Poszukiwania tzw. bezneutrinowego podwójnego rozpadu  $\beta$  (GERDA).
- Badania oscylacji dla znanej dokładnie wiązki z akceleratora (K2K, CNGS).

Schemat eksperymentu KATRIN planującego pomiar masy neutrina elektronowego z dokładnością do  $0.2 \text{ eV}/c^2$ . Badany jest rozpad beta trytu. Intensywność źródła i dokładność pomiaru są o rząd wielkości lepsze niż w poprzednich eksperymentach.

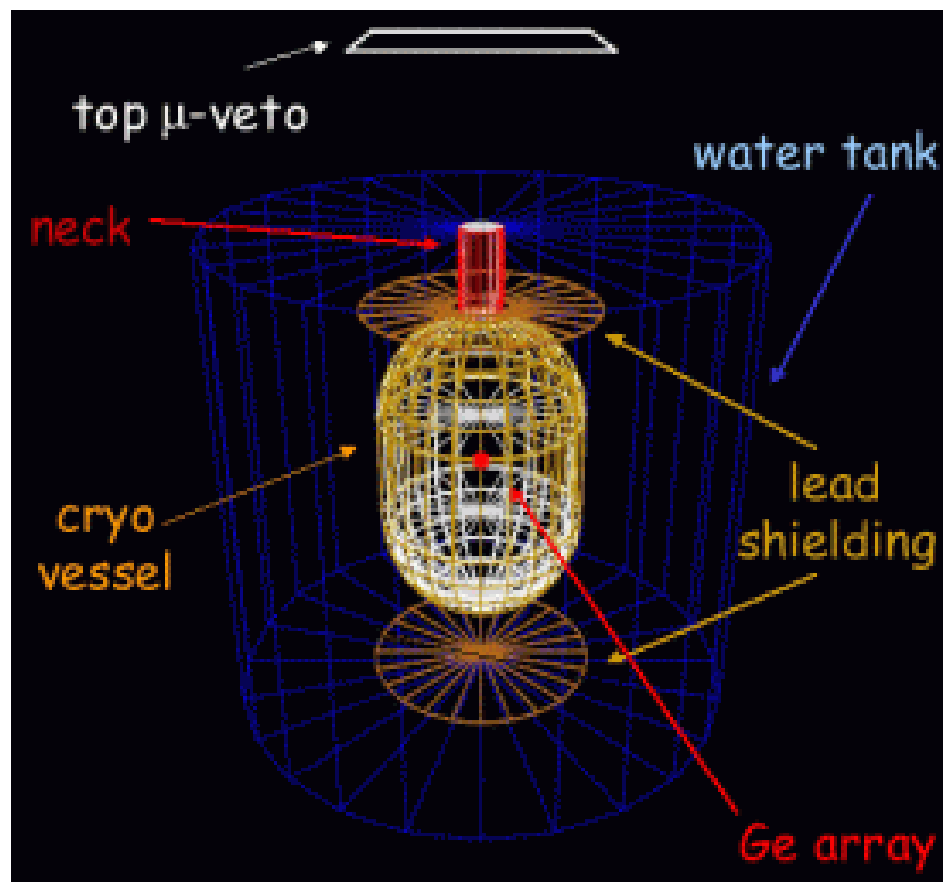


**KATRIN od źródła trytu do detektora**

# Bezneutrinowy podwójny rozpad $\beta\beta$ (lata '30)

- Maria Goeppert-Mayer: są jądra parzysto-parzyste, dla których nie ma rozpadu  $\beta$  (jądro z  $Z'=Z+1$  jest cięższe), ale możliwy rozpad  $\beta\beta$ :  
 $(Z) \rightarrow (Z+2) + 2e + 2n$  (jądro z  $Z'=Z+2$  jest lżejsze!).
- Ettore Majorana: teoria neutrin tożsamyh z antyneutrinami.
- Racah, Furry: dla takich neutrin możliwe nowe procesy, w tym „bezneutrinowy rozpad  $\beta\beta$ ”:  
 $(Z) \rightarrow (Z+2) + 2e$
- Jeśli wykryjemy, udowodnimy, że neutrina to „cząstki Majorany” i wyznaczymy ich masę! Ale te rozpady są bardzo rzadkie, a izotopy drogie...

# Schemat eksperymentu GERDA w Gran Sasso





# CNGS

- Aby wykryć oscylacje dla „wygodnych” energii neutrin, „daleki” detektor musi być setki kilometrów od źródła – akceleratora (podobnego, jak w eksperymencie LSS).
- Na szczęście neutrina mogą lecieć bez „prowadnicy”, prosto przez Ziemię.
- Już działa taki układ w Japonii (K2K). Wkrótce ruszy CNGS (z CERN-u pod Alpami do Gran Sasso we Włoszech).

# CERN → Gran Sasso

