

Jak to działa?

- **synteza jąder** lekkich pierwiastków jest możliwa po zbliżeniu ich na bardzo małą odległość (w obszarze zasięgu sił jądrowych)
- ujemny **mion** jest cząstką zachowującą się w materii tak jak ciężki elektron ($m_\mu = 207m_e$), m.in. miony mogą zastępować elektrony na orbitach atomowych
- **atomy i molekuly mionowe** są $\frac{m_\mu}{m_e} \times$ mniejsze od zwykłych atomów (molekuł)
- jeśli mieszaninę deuteru i trytu (D_2+T_2) naświetlać mionami to powstają w niej **molekuly mionowe $d\mu$**
- synteza jąder deuteru (d) i trytu (t) zachodzi bezpośrednio po utworzeniu molekuly $d\mu$ (odległość d-t jest $200\times$ mniejsza niż w zwykłej molekule !)
- mion nie bierze udziału w reakcji jądrowej, po jej zakończeniu uwalnia się i może zapoczątkować następny cykl reakcji (działa jak **katalizator**)
- nie potrzebna jest wysoka temperatura (jak np. 10 milionów °C w Słońcu) – zjawisko zachodzi w pokojowej temperaturze, a nawet przy kilku °K !
- w reakcji wydziela się **ogromna ilość energii** 17.6 MeV; dla przykładu, w chemicznej reakcji spalania węgla (synteza $C + O_2 \rightarrow CO_2$) wydziela się energia 4.2 eV, czyli 4 miliony \times mniej)

Ograniczenia

To piękne w swej prostocie zjawisko ma swoje ograniczenia: — mion rozpada się po 2.2 μ s, — do wyprodukowania mionu potrzebna jest energia ok. 5 GeV; aby uzyskać dodatni bilans energetyczny konieczne jest aby jeden mion wywołał łańcuch nie mniej niż 300 reakcji syntezy.

Wąskie gardło a: szybkość tworzenia molekuł mionowych, "przyklejanie" mionu do produktów reakcji, przechwyt mionu przez ^3He ("zatrucie" helem 3 powstającym przy rozpadzie trytu).

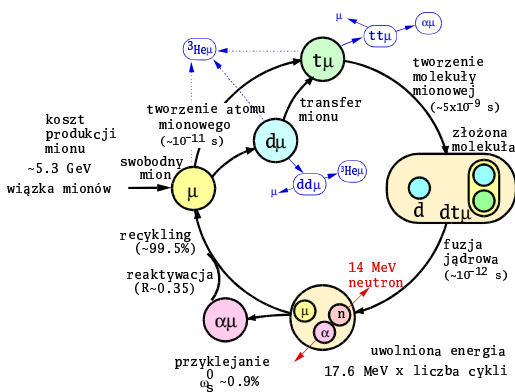
Perspektywy

Aktualnie zjawiska katalizy mionowej nie da się jeszcze zastosować do produkcji energii na skalę przemysłową. Dokonuje się powolny ale jednak systematyczny postęp w badaniach. W Japonii buduje się instalację (KEK/JAERI, wiązka protonów 3 GeV, 330 μ A), w której w ciągu kilku najbliższych lat planowane jest osiągnięcie mocy rzędu watów w reaktorze μ CF.

Prace WFiTJ AGH

Wydział Fizyki i Techniki Jądrowej bierze udział w badaniach nad katalizą mionową od połowy lat 80-tych we współpracy z ZIBJ Dubna, Paul Scherrer Institute, TRIUMF Vancouver, Uniwersytetem we Fryburgu (prace doświadczalne i teoretyczne, m.in. kinetyka procesów μ -atomowych i μ -molekularnych [1, 2], kataliza syntezy w innych egzotycznych molekułach [3], np. $d^3\text{He}\mu$ etc., ponad 120 publikacji).

Cykl katalizy mionowej reakcji syntezy



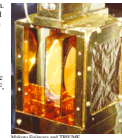
Zjawisko przewidziane teoretycznie przez Franka i Sacharowa zaobserwował doświadczalnie Alvarez w roku 1957. Odkrycie rezonansowego tworzenia molekuł $d\mu$ na przełomie lat 1970/80 (Dubna), a następnie zaobserwowanie 150 cykli syntezy inicjowanych przez jeden mion wskazało na możliwość wykorzystania katalizy mionowej do produkcji energii w kontrolowanej reakcji syntezy jąder.

Physical Review Focus

Resonant Formation of $d\mu$ Molecules in Deuterium: An Atomic Beam Measurement of Muon-Catalyzed Fusion
M. C. Fujiwara, A. Adamecrak, J. M. Bailey, G. A. Beer, J. L. Beveridge, M. P. Fallon, T. M. Huber, P. Kametani, S. K. Kim, P. E. Knowles, A. R. Kunceman, M. Maier, V. E. Markushin, G. M. Marshall, C. J. Martini, G. R. Manca, F. Mulhauser, A. Olin, C. Petitjean, T. A. Percelli, J. Phys. Rev. Lett. **88**, 1642 (21 August 2000)

One Less Bottleneck for Fusion

You don't need temperatures as hot as the Sun for nuclear fusion. Rather than squeezing nuclei together with high temperature and pressure, the muon-catalyzed fusion (μ CF) approach lets a muon do the squeezing—by forcing a pair of nuclei into close quarters as the muon orbits at a short distance. Some researchers hope to make it practical for power generation in the future, although they have also been interested in the muonic molecule itself. A collaboration reporting in the 21 August PRL has now directly observed a dramatic enhancement in the formation of the muonic molecule, an essential process considered a "bottleneck" for μ CF, using a new approach. They created a beam of muonic tritium atoms to get a clean, isolated measurement of the exotic molecule created just before fusion.



The goal in nuclear fusion is to force a deuterium (d = proton + neutron) and a tritium (t = proton + 2 neutrons) into such close proximity that the strong nuclear attraction between the two pulls them together, overcoming their electrical repulsion. In μ CF, the muon does this by first replacing the electron orbiting a tritium, to make muonic tritium, or $t\mu$. The $t\mu$ then corals one of the d nuclei of a D_2 molecule ($2d^+$ + 2 electrons) to form $d\mu$, without separating from the other, more distant d nucleus and two electrons. The $d\mu$ is so tightly bound that it acts like a single nucleus in this unusual, "compounded molecule" that is the critical intermediate before fusion occurs.

A single muon zipping through a medium enriched with deuterium and tritium can catalyze perhaps 150 fusions, but ten times that number would be needed for a reactor to "break even" in energy. One of the bottlenecks that limit the μ CF process is the formation of the $d\mu$ because the molecule has trouble getting rid of the kinetic energy of the μ . Experiments beginning in the 1980s suggested that if the μ comes in with enough energy, the $d\mu$ can form in an excited state and deliver the extra energy to specific rotations and vibrations of the 3-nucleon molecular complex. Theories predicted that this "resonant enhancement" would be optimized with a μ having 1 eV of energy, but the only way to

control its energy was indirect—by heating the medium, which could only achieve the equivalent of 0.05 eV.

Now an international collaboration led by Glen Marshall of TRIUMF in Vancouver, Canada, has dramatically demonstrated the resonant formation of the $d\mu$ at ten times the rate of previous experiments by creating a μ beam. The TRIUMF muon beam was aimed at an "aperture" target of tritium-enriched hydrogen followed by a "moderator" layer to slow down the μ 's produced in the first layer. The μ 's then flew through an 18-mm gap—which the team used to check their speed—before hitting the final, "beam-trap" target of deuterium (D_2) cooled to 1 K. Since the tritium is radioactive, team member Makoto Fujiwara, now of the University of Tokyo, calls the experiment "cold fusion with hot atoms."

The researchers clearly measured the number of fusions (which produce detectable alpha particles) at each μ energy. Their data confirm the predictions of a $d\mu$ enhancement near 1 eV and also probe the energy structure of three vibrational states of the compounded molecule, because the likelihood of fusion depends on the μ energy matching the vibrational energies.

James Cohen of Los Alamos National Laboratory in New Mexico says the new data strongly suggest that the first bottleneck in μ CF can be eliminated, and only one other remains—the tendency of the muon to "stick" to the outgoing alpha particle after fusion, although "that one would seem to be less amenable to control," he says. Still, Cohen is most interested in the basic physics of forming the compound molecule, whether or not μ CF leads to a practical device. He's also very impressed with the experiment itself. "Theorists think something can't be done experimentally, and clever experimentalists are able to do it anyway," he says, noting that a decade ago "I'd have said I couldn't imagine any way of doing it."

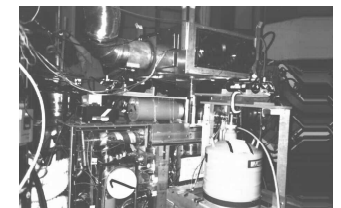
Related links:
TRIUMF: Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics
Phys. Rev. A **61**, 052713 (2000) A recent *ab initio* calculation of the formation of $d\mu$.
Previous Focus Story / News Focus Story / Focus Homepage

PRL online / PRL Tables of Contents / APS Research Journals

© 2000 The American Physical Society. All rights reserved.

References

- [1] W. Czaplinski *et al.*, Hyperfine Interactions, **142** (2002) 577.
- [2] J. Woźniak *et al.*, Phys. Rev., **A68** (2003) 62502.
- [3] V. Bystritsky *et al.*, Phys. Rev., **A69** (2004) 12712.



fragment aparatury pomiarowej na wiązkę mionowej w centrum badawczym TRIUMF, Vancouver, Kanada