

tylko około 46% słonecznych neutrin elektronowych z liczby przewidzianej przez standardowy model Słońca. Co oczywiście zaniepokoiło naukowców. W poszukiwaniu odpowiedzi na pytanie, gdzie podziały się pozostałe neutrino elektronowe, przeprowadzono pomiary w innym detektorze: Sudbury Neutrino Observatory (SNO) znajdującym się w Kanadzie. Ten detektor jest w stanie rejestrować oddziaływania neutrin mionowych i taonowych ze Słońca. Okazało się, że brakujące neutrino elektronowe nie znikają, tylko zmieniają się w neutrino taonowe albo neutrino mionowe, zanim jeszcze opuszczą Słońce. Za to odkrycie w 2015 roku część Nagrody Nobla z fizyki przyznano Arthurowi McDonaladowi.

Neutrino atmosferyczne i ich przemiany

Drugą część Nagrody Nobla w 2015 roku otrzymał Takaaki Kajita za odkrycie oscylacji neutrin atmosferycznych w eksperymencie Super-Kamiokande. W atmosferze ziemskiej w wyniku oddziaływania promieniowania kosmicznego z atomami tlenu i azotu powstają neutrino mionowe i elektronowe. Te neutrino są również rejestrowane przez eksperyment Super-Kamiokande. Łatwo jest je odróżnić od neutrin słonecznych, ponieważ mają znacznie wyższą energię – od kilkunastu GeV do TeV. W detektorze rejestrujemy neutrino atmosferyczne przychodzące zarówno z nad detektora – po przejściu przez 1 kilometr góry, jak i te, które powstały po drugiej stronie kuli ziemskiej i przeniknęły przez całą średnicę Ziemi (oraz oczywiście neutrino pochodzące ze wszystkich innych stron wokół kuli ziemskiej). Zaobserwowano, że część neutrin mionowych, które przeszły przez kulę ziemską, znikają po drodze.

Po tym odkryciu przeprowadzono pierwszy eksperyment wykorzystujący wiązkę neutrin mionowych (K2K)

wyprodukowanych przy użyciu akceleratora (w laboratorium KEK w Japonii). Wiązkę tę wysyłano w kierunku odległego o 250 km detektora Super-Kamiokande. Okazało się, że neutrino mionowe po drodze przemieniały się w neutrino taonowe (oscylacje $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$).

Do odkrycia pozostała jeszcze jedna transformacja – neutrin mionowych w neutrino elektronowe. Zadanie to udało się zrealizować w ramach eksperymentu akceleratorowego T2K, prowadzonego obecnie dzięki współpracy dwóch laboratoriów. Intensywna wiązka neutrin mionowych jest produkowana w akceleratorze JPARC w Japonii i wysyłana do oddalonego o 295 km detektora Super-Kamiokande. W eksperymencie T2K potwierdzono pojawianie się neutrin elektronowych w wiązce neutrin mionowych, czyli oscylacje $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$.

Na tym jeszcze nie koniec, ale... zbliża się koniec dniówki w kopalni. Dzisiaj nie było tak spokojnie, jak się można było spodziewać na początku szychty. W pewnym momencie uruchomił się alarm wybuchu supernowej. Kiedy gwiazda umiera, zapada się grawitacyjnie i wybucha. Wtedy emitowane jest zarówno światło, jak i strumień niskoenergetycznych neutrin. Jak do tej pory, w detektorze neutrin zaobserwowano takie zdarzenie tylko raz, w 1987 roku. Jak łatwo się domyślić, po uruchomieniu się alarmu nasza ekscytacja sięgnęła zenitu. Czyżbyśmy mieli szczęście i w trakcie dzisiejszej szychty wybuchła kolejna supernowa w naszej Galaktyce?

Niestety... tym razem to tylko test. Poddano próbie naszą czujność, wywołując sztucznie alarm supernowej i sprawdzając, czy zareagujemy zgodnie z procedurami. Udało się, zaliczyliśmy test. I pozostaje nam nadal oczekiwać – na wybuch prawdziwej supernowej.



Szczęście z jelita

Nie od dziś wiadomo, że ćwiczenia fizyczne budują formę i poprawiają nastrój, zalecane są osobom narażonym na stres. Wiadomo także, że w ciągłym ruchu są (lub chcą być) dzieci. W zeszłym roku naukowcy z Szanghaju, Jing, Jia i Yang, w publikacji w „Neuroscience” sformułowali hipotezę, że aktywność fizyczna wspomaga prawidłowy rozwój mózgu we wczesnym dzieciństwie, a dzieje się tak dzięki serotoninie. Obserwując grupkę kilkulatków w parku, zastanawiam się, ilu z opiekunów zdaje sobie sprawę, że oto radosne brykanie jest tak naprawdę kształtowaniem funkcji poznawczych, rozwojem pamięci i tworzeniem społeczno-emocjonalnej podstawy rozwijającego się człowieka. W jaki sposób maleńka cząsteczka zwana „hormonem szczęścia” bierze w tym udział?

Autorzy publikacji zebrali wyniki z wielu artykułów naukowych i przedstawili kilka najważniejszych informacji wyjściowych. Po pierwsze aktywność fizyczna u dzieci korzystnie wpływa na ich rozwój: wzmacnia siłę mięśni, gęstość kości, poprawia wydolność krążeniowo-oddechową. Ale nie tylko. Ruch służy prawidłowemu rozwojowi kontroli emocji i procesów poznawczych: myślenia, uczenia się, pamięci i tzw. „funkcji wykonawczych”, czyli tego, jak na podstawie dostępnych informacji i wiedzy podejmować decyzje i określone działania. Nic zatem dziwnego, że WHO w 2019 roku wydało rekomendację, w której zaleca się, żeby dzieci między 3 a 4 rokiem życia minimum 3 godziny dziennie spędzały aktywnie fizycznie, w tym godzinę intensywnie.

Po drugie, od dawna badania wykazują, że aktywność fizyczna stymuluje przepływ sygnałów w układzie nerwowym, pobudza namnażanie się komórek nerwowych i zwiększa produkcję neuroprzekazników.

Po trzecie, autorzy cytują prace wykazujące, że aktywność fizyczna podnosi poziom serotoniny. Przynajmniej u zwierząt – co badano w eksperymentach na szczurach. Wprowadzano im do mózgu cienkie rurki umożliwiające pobieranie próbek do analizy, a następnie wkładano do koła treningowego kręcącego się z dużą prędkością przez dwie godziny. Bez względu na to, co myślimy o losie szczurów laboratoryjnych, trzeba przyznać, że wyniki tych badań wskazują, iż poziom serotoniny w mózgach ćwiczących zwierząt rośnie. Problem polega na tym, że trudno bada się poziom czegokolwiek w ludzkim mózgu, a szczególnie jeśli jest to mózg małego dziecka.

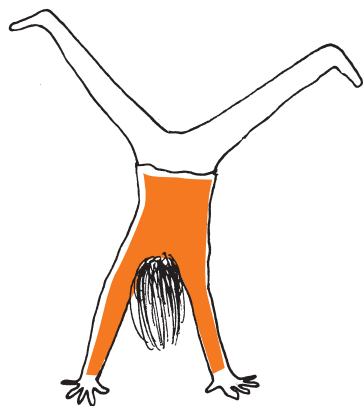
Dlaczego nie pobrać po prostu krwi? Tu się sprawy komplikują.

Serotonina to niewielka cząsteczka, która powstaje z jednego z aminokwasów (cegiełek budulcowych białek), tryptofanu. Ludzkie komórki nie potrafią syntetyzować tryptofanu, pochodzi on zatem z trawionego jedzenia (głównie mięsa, nabiału, nasion soi i dyni).

Serotonina powstaje z tryptofanu w dwóch reakcjach, z których pierwsza prowadzona jest przez enzym TPH. Ponad 90% serotoniny w ludzkim ciele powstaje w tzw. komórkach chromochłonnych wyściółki żołądka, jelita cienkiego i grubego, dzięki aktywności enzymu TPH1. Serotonina trafia do krwi obwodowej i jest magazynowana w płytkach krwi. Reguluje tu krzepnięcie krwi, ciśnienie tętnicze (dzięki wpływowi na kurczenie się naczyń krwionośnych), pobudza prawidłową pracę żołądka i jelit. Ale w mózgu

cząsteczki serotoniny pełnią inne funkcje. Jest neuroprzekaznikiem – wpływa zatem na przekazywanie sygnałów między neuronami, reguluje działanie wielu obszarów mózgu, głównie tych odpowiadających za regulację emocji, snu, apetytu, wpływa na pamięć, koncentrację uwagi, zachowania seksualne. Co jednak najważniejsze, jest ona niezbędna do prawidłowego rozwoju mózgu, szczególnie w okresie prenatalnym i kilku pierwszych latach życia. Już po kilku tygodniach od zapłodnienia rozwój układu nerwowego, a zwłaszcza mózgu, wskakuje na najwyższy możliwy poziom. Według niektórych szacunków w tym czasie powstaje kilkadziesiąt tysięcy komórek nerwowych na minutę. Mózg 5-latką waży prawie tyle samo co osoby dorosłej. Nie świadczy to jednak o poziomie jego rozwoju: nie chodzi tylko o liczbę komórek, ale przede wszystkim o komunikację między nimi. Po czasie szaleńczego wzrostu liczby komórek nerwowych następuje ich dojrzewanie i gwałtowne zwiększanie się liczby synaps, czyli połączeń między nimi. Szacuje się, że w pierwszych latach życia może ich przybywać nawet milion na sekundę. Po tym czasie następuje proces nazwany po angielsku „pruning” – przycinanie: liczba połączeń między neuronami zmniejsza się, pozostają tylko te, które były najbardziej używane. W procesach tych serotonina jest niezbędna do powstawania nowych komórek nerwowych, do przemieszczania się niedojrzałych neuronów w odpowiednie miejsca, do różnicowania się komórek na różne typy i ich dojrzewania, w końcu stymuluje powstawanie synaps i decyduje o tzw. plastyczności synaptycznej – moduluje ich działanie.

Serotonina mózgowa nie pochodzi z puli cząsteczek krwi obwodowej, ponieważ nie przechodzi przez barierę krew-mózg. Na szczęście barierę tę przechodzi tryptofan, i z niego powstaje serotonina w tzw. jądrach szwu, w rejonie pnia mózgu.



W finale dochodzenia chińscy naukowcy ustalili, że aktywność fizyczna wpływa nie tyle na samą serotoninę, ale na obecność we krwi jej wolnego prekursora, tryptofanu. Autorzy postulują dwa możliwe mechanizmy. Po pierwsze, tryptofan we krwi wiąże się z białkiem, albuminą, z której jest uwalniany w razie potrzeby. Albumina transportuje także wolne kwasy tłuszczowe (tzw. NEFA), których pojawia się dużo przy długotrwałym lub intensywnym wysiłku fizycznym. NEFA i tryptofan konkurują ze sobą. Kiedy cząsteczek NEFA jest więcej, wypierają one z albuminy tryptofan, a ten, uwolniony, przenika do mózgu.

Po drugie, aktywność fizyczna wpływa na florę bakteryjną w jelitach. Niektóre gatunki mikroorganizmów syntetyzują i wydzielają poza swoją komórkę tryptofan (i także serotoninę). Gatunki te szczególnie dobrze rozwijają się w jelitach ludzi aktywnych fizycznie, także dzieci, zwłaszcza tych, które mają kontakt z naturą, gdzie mogą się ubrudzić i jednocześnie zmęczyć. W ten sposób, bez względu na dietę, źródłem tryptofanu wędrującego do mózgu są bakterie jelitowe.

Wciąż pokutuje podział sprzed wielu lat na dzieci, które się uczą, i na te, które biegają. Wygląda jednak na to, że to ci, którzy biegają, skaczą, wspinają się, dyndają, jeżdżą, kręcą się i fikają koziołki, będą się uczyć najlepiej. Czyżbyśmy zapomnieli, że jesteśmy skąpo owłosioną małpą, która niedawno zeszła z drzewa?

Literatura

Jia-Qi Jing, Si-Jia Jia, Chang-Jiang Yang, “Physical activity promotes brain development through serotonin during early childhood”, *Neuroscience* 554 (2024) 34–42.

Marta FIKUS-KRYŃSKA