

Naslov članka/Article:

## Higgsov bozon in škatle skrivnosti: Kako deluje znanost?

Higgs Boson and Mystery Boxes: How Does Science Work?

Avtor/Author:

Anja Kranjc Horvat

DOI:

CC licenca



Priznanje avtorstva-Nekomercialno-Brez predelav



Fizika v šoli št. 1/2022, letnik 27

ISSN 1318-6388

Izdal in založil: Zavod Republike Slovenije za šolstvo

Kraj in leto izdaje: Ljubljana, 2022

Spletna stran revije:

<https://www.zrss.si/strokovne-revije/fizika-v-soli/>

# Higgsov bozon in škatle skrivnosti: Kako deluje znanost?

**Anja Kranjc Horvat**

Evropska organizacija za jedrske raziskave CERN, Ženeva, Švica

**Jakob Novak, Blaž Leban**

Institut Jožef Stefan, Ljubljana, Slovenija

## Izvleček

Iskanje Higgsovega bozona danes velja za najdaljše raziskovanje v zgodovini fizike delcev. Večdesetletno sodelovanje med teoretičnimi in eksperimentalnimi fiziki, inženirji, tehniki, diplomati in tudi učitelji, ki je vodilo do tega odkritja, je tako izvrsten primer znanosti v nastajanju. Zgodovina tega prelomnega odkritja lahko učencem in dijakom pomaga spoznati različne vidike narave znanosti in znanstvenih metod raziskovanja. V tem članku bomo predstavili kratek oris zgodovine raziskovanja Higgsovega bozona ter jo prek praktičnih aktivnosti s škatlami skrivnosti neposredno povezali z naravo znanosti. Predstavljene aktivnosti so primerne tako za osnovne kot tudi srednje šole, učitelji pa za izvedbo potrebujejo minimalno opremo.

**Ključne besede:** Higgsov bozon, fizika delcev, narava znanosti, škatle skrivnosti

## Higgs Boson and Mystery Boxes: How Does Science Work?

### Abstract

The search for the Higgs boson is now considered to be the lengthiest in the history of particle physics. The decades-long collaboration between theoretical and experimental physicists, engineers, technicians, diplomats, and even teachers, which led to this discovery, is thus a remarkable example of science in the making. The history of the ground-breaking discovery can help pupils and students learn about several aspects of the nature of science and the scientific method of research. This article briefly outlines the history of the research into the Higgs boson and relates it directly to the nature of science through hands-on mystery box activities. These are suitable for both primary and secondary schools and require minimal equipment.

**Keywords:** Higgs boson, particle physics, nature of science, mystery boxes.

### Uvod

Fiziki delcev leta 2022 praznujejo prav posebno obletnico. Pred desetimi leti, 4. julija 2012, se je namreč končalo večdesetletno iskanje Higgsovega bozona, osnovnega delca, ki ga je Peter Higgs predvidel že v šestdesetih letih prejšnjega stoletja. Kar 48 let je trajalo, da so njegovo hipotezo lahko tudi eksperimentalno preverili. Eksperiment, ki so ga za to potrebovali, je namreč največji in najkompleksnejši eksperiment v fiziki – veliki hadronski trkalnik v Evropski organizaciji za jedrske raziskave (CERN) v Švici. Pri tem eksperimentu je sodelovalo več tisoč znanstvenikov, strojnikov, gradbenikov in mnogih drugih, ki so stremeli k istemu cilju – boljšemu razumevanju sveta in vesolja.



**Slika 1:** Odkritje Higgsovega bozona je bilo razglašeno 4. julija 2012 v CERN. Na sliki je trenutna direktorica CERN, takratna vodja kolaboracije eksperimenta ATLAS. [1]

## Kaj sploh je Higgsov bozon in zakaj je zanimiv?

V teoriji standardnega modela, ki trenutno najnatančneje opisuje pojave na lestvici osnovnih delcev, so polja ključnega pomena. Osnovni delci, kakršen je tudi Higgsov bozon, so vzbujena stanja teh polj. Vsaka vrsta delcev je vzbujeno stanje svojega polja. Tako je foton vzbujeno stanje elektromagnetnega polja, elektron vzbujeno stanje elektronskega polja, Higgsov bozon pa vzbujeno stanje Higgsovega polja.

Polja si lahko predstavljamo kot vodo, ki zaseda vso prostornino morja. Če gladino morja vzbudimo s kamenčkom, lahko nad gladino opazimo pljusk vode. Ta pljusk si lahko predstavljamo kot delce. Higgsov bozon je tako kot nekakšen pljusk, ki nastane, ko vzbudimo Higgsovo polje.

Tovrstna polja so prisotna povsod v vesolju in tako vplivajo tudi na svet okoli nas. Elektromagnetno polje tako povzroča elektromagnetno silo med nabitimi delci, posledica prisotnosti Higgsovega polja pa je masa delcev. Delci imajo tako različne mase zaradi različnega vpliva Higgsovega polja nanje. Elektroni so torej lahki, saj Higgsovo polje nanje nima močnega vpliva. Po drugi strani pa na primer Higgsovo polje mnogo močnejše vpliva na mione, kar povzroči, da imajo ti višjo maso.

Higgsovo polje zapolnjuje prav vse kotičke vesolja: od središča Sonca do brezmejnega prostora med zvezdami. Noben delec snovi ne uide vplivu Higgsovega polja, zato v vesolju ne najdemo brezmasnih elektronov. Vesolje, kot ga poznamo, brez Higgsovega polja ne bi moglo obstajati. Brezmasni elektron ne bi bil vezan na atomsko jedro, torej vesolje ne bi bilo sestavljeno iz atomov. Poleg tega v odsotnosti Higgsovega polja ne bi bilo protonov, saj bi ti v trenutku razpadli v nevtrone. Nihče si ne zna zares predstavljati, kakšno bi bilo vesolje brez Higgsovega polja. Vsekakor pa galaksij, supernov, planetov in življenja ne bi bilo.

Dolgoletno raziskovanje, ki je vodilo k odkritju Higgsovega bozona, lahko pomaga učencem predstaviti tako fiziko delcev kot tudi naravo znanosti in znanstvenega raziskovanja. V tem članku bomo zato večje preskoke v raziskovanju Higgsovega bozona povezali z najpomembnejšimi vidiki narave znanosti ter s praktičnim eksperimentiranjem s škatlami skrivnosti. Upamo, da bomo z dodanimi tremi aktivnostmi za učence čim več učiteljev spodbudili, da vpeljejo tovrstne aktivnosti tudi v svoj razred.

## Narava znanosti

Poznavanje narave znanosti je osnova znanstvene pismenosti [2]. Ravno zato so vidiki narave znanosti vključeni v učne načrte osnovnih in srednjih šol po vsem svetu kot del splošnih ciljev. Kljub temu pa učenci pogosto nimajo dobrega razumevanja narave znanosti [3]. Glede

na to, da učni načrti in učbeniki principe narave znanosti vključujejo pomanjkljivo in pretežno implicitno [4, 5], pomanjkanje razumevanja niti ni presenetljivo. Navsezadnje raziskave kažejo, da je eksplicitno poučevanje ključno za uspešno usvajanje narave znanosti [6, 7].

Različni viri poročajo o različnih vidikih narave znanosti. V tem članku se osredotočamo zgolj na nekaj najpomembnejših, povzetih po [8], ki so opisani v naslednjih nekaj odstavkih.

**Znanost je negotova.** Znanost je zanesljiva in verodostojna, vendar nikoli gotova. Znanstvena dognanja se skozi čas spreminjajo na podlagi novih dognanj. Napredki v tehnologiji nam namreč omogočajo boljše in natančnejše meritve, medtem ko lahko z napredkom v teoriji drugače interpretiramo že obstoječe podatke.

**Znanost je empirična.** Znanstvena dognanja temeljijo na opazovanju naravnih pojavov. Pri tem za opazovanje štejemo tako opazovanje s človeškimi čutili (na primer s sluhom) kot tudi z merskimi instrumenti.

**Znanost je vpeta v teorijo.** Sodobna znanost redko izvira iz opazovanja naravnih pojavov. Pogostejše raziskave izvirajo iz teoretičnih predvidevanj. Pri tem znanstveniki na podlagi določene teorije ustvarijo napoved izida testnega eksperimenta, ki ga nato primerjajo z rezultati eksperimenta. Če se napoved in rezultat ujemata, se zaupanje v teorijo, ki jo testirajo, poveča.

**Znanost je vpeta v družbo.** Znanost odseva določeno družbeno in kulturno okolje. To okolje določa, v katero smer naj se znanost giblje, hkrati pa to povzroča določeno mero subjektivnosti. En sam znanstvenik lahko tako rezultate eksperimenta interpretira subjektivno. S številom znanstvenikov, ki se z določeno interpretacijo strinjajo, pa zaupanje v interpretacijo raste. Znanstvena stroka ima zato dobro definirane postopke, ki pomagajo znanost narediti objektivnejšo (na primer strokovne recenzije in znanstvene konference).

**Znanstvena metoda ni samo ena.** V znanosti ni samo enega recepta za uspeh. Včasih raziskave izvirajo iz teorije, včasih iz eksperimenta. Raziskava je lahko tudi sam napredek teorije. Kljub temu da so določeni principi raziskovanja vsem metodam skupni, tako ne moremo govoriti o eni in edini pravi znanstveni metodi.

Omenjene vidike narave znanosti lahko učencem in dijakom približamo na različne načine. Dva izmed teh načinov sta predstavljena v tem članku. Najprej si bomo pogledali dve aktivnosti s škatlami skrivnosti, nato pa še eno s pripovedovanjem zgodb (angl. *storytelling*).

## Škatle skrivnosti

Škatle skrivnosti ali črne škatle so zaprte škatle z notranjo organizacijo, strukturo in obnašanjem, o katerih opazovalec nima informacij. Opazovalec ima le možnost vplivanja na sistem skozi vhodne kanale ter možnost za-

znavanja odzivov skozi [9]. Ravno zato so škatle skrivnosti zelo dobro orodje za poučevanje konceptov narave znanosti [10–13]. Še boljše, uporabne so za zelo širok spekter starosti – vse od vrtca pa do srednje šole [14], marsikdo pa se iz njih kaj nauči tudi pozneje.

Aktivnosti, opisane v tem članku, uporabljajo škatle skrivnosti s skrito notranjo strukturo in jekleno kroglico, kot je prikazano na sliki 2. Ko škatlo premikamo, se kroglica kotali po notranjosti in zaletava v stene notranje strukture škatle. S pazljivim poslušanjem lahko na podlagi trkov s stenami določimo obliko te notranjosti. Material same žogice nam hkrati omogoča tudi zelo enostavno nadgradnjo eksperimenta, saj si lahko pri raziskovanju notranje strukture pomagamo tudi z magnetom. Velja pa omeniti, da lahko predstavljene aktivnosti izvajamo tudi s katero koli drugo obliko škatel skrivnosti, na primer s škatlo s skritim predmetom [15], s cevjo s poljubno prepletenimi vrvicami na sredini [16] ali celo s škatlo s skritim sistemom posod za vodo [17]. Vsem vrstam škatel skrivnosti je skupno to, da lahko učenci

njihovo notranjo zgradbo opazujejo zgolj posredno, kar jih spodbudi, da se s serijo poskusov poskušajo čim bolj približati odgovoru.



**Slika 2:** Škatla skrivnosti s skrito notranjo strukturo in jekleno kroglico. Škatla je natisnjena s 3D-tiskalnikom. Navodila za to 3D-natisnjeno škatlo lahko najdete na <https://scoollab.web.cern.ch/3d-printable-mystery-box>. [18]

## Aktivnost 1: Opazovanje škatel skrivnosti

Prva aktivnost je opazovalni eksperiment, ki je primeren tako za osnovnošolce kot tudi za srednješolce. S pomočjo te aktivnosti se učenci in učenke spoznajo s škatlami skrivnosti ter z načinom dela pri tovrstnih aktivnostih. Cilj te aktivnosti je učencem predstaviti, kako razviti znanstveni model.

Učenci so razdeljeni v manjše skupine (3–4 učenci na skupino). Vsaka skupina prejme velik bel list papirja in flomastr (še bolje je, če je list papirja plastificiran, da lahko skupina svoje delo enostavno popravlja). Učitelj za demonstracijo potrebuje eno večjo škatlo skrivnosti katerega koli tipa.

### 1. Demonstracija škatle skrivnosti

Učitelj predstavi škatlo skrivnosti tako, da lahko učenci z opazovanjem sklepajo o notranjosti škatle. V primeru zgoraj opisane škatle z notranjo strukturo učitelj škatlo obrača, da lahko učenci slišijo premikanje kroglice. Pri tem učitelj izpostavi, da ta del aktivnosti predstavlja empirično naravo znanosti. Znanstvene hipoteze najpogosteje izhajajo iz naših opazovanj, bodisi neposrednih (npr. zunanost škatle je okrogla) bodisi posrednih (npr. notranjost škatle je v obliki trikotnika). Tako je tudi potreba po iskanju Higgsovega bozona delno prišla iz opazovanja. Čeprav je teorija narekovala brezmasne delce, so opazovanja pokazala, da delci maso vendarle imajo.

### 2. Ustvarjanje hipotez

V naslednjem koraku učenci individualno razmislijo, kaj bi lahko bilo v škatlah. Sploh pri mlajših učencih naj učitelj spodbuja čim bolj ustvarjalne ideje. Naj torej ne bo narobe, če učenci predlagajo skritega palčka v škatli ali zvočnik, ki predvaja zvok. Ustvarjalnost je namreč izjemno pomembna tudi v znanosti in tehnologiji. Ustvarjalno razmišljanje je namreč tudi Tima Berner-Leeja privedlo do iznajdbe svetovnega spleta. Njegova naloga v CERN je namreč bila znanstvenikom z vsega sveta zagotoviti lažji dostop do informacij. Verjetno pa si takrat nihče ni niti predstavljal, kako lahko takšna naloga popolnoma spremeni svet.

### 3. Iskanje znanstvenega soglasja

Učenci svoje ideje najprej predstavijo v svoji skupini, kjer se skupaj odločijo za model, ki se jim zdi najverjetnejši. Skupine nato svoje modele predstavijo še drugim skupinam. Pri tem je treba spodbujati kritično diskusijo o omejitvah predstavljenih modelov in mogočih izboljšavah.

Brout, Englert in Higgs so svoje teoretične modele o delovanju Higgsovega polja predstavili v več člankih, objavljenih v zelo pomembnih fizikalnih revijah. S temi objavami so svoje delo poslali več tisoč znanstvenikom, ki so njihovo delo ovrednotili na podlagi lastnih izkušenj in znanja. Soglasje znanstvenikov po vsem svetu je bilo osnova za nadaljevanje raziskovanja in gradnjo novih eksperimentov.

### 4. Znanstvena negotovost

Aktivnost sklenemo z vodenjo diskusije o znanstveni negotovosti. Pri tem učitelj spodbuja učence k razmišljanju o delih notranje strukture, ki jih ne moremo zaznati z opazovanjem tega tipa, na primer o barvi, okusu ali teksturi. V resnici brez odpiranja škatle ne moremo vedeti niti, ali je naše znanstveno soglasje res točno.

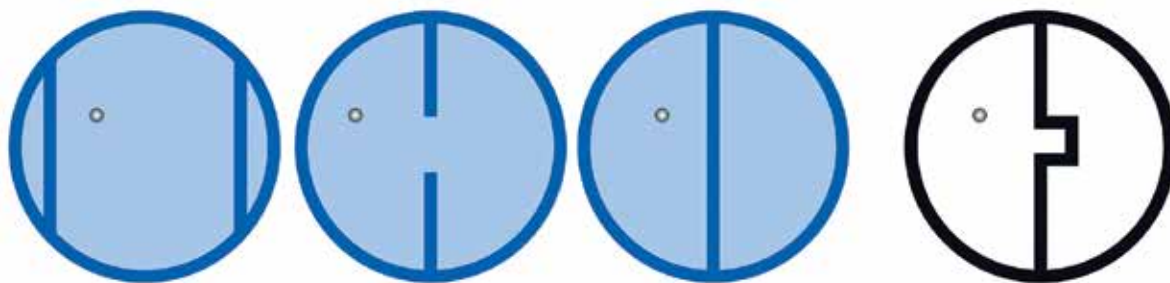
Znanstvena negotovost je eden izmed težje razumljivih vidikov znanosti. V znanosti se tako vedno pogovarjamo o verjetnostih. Odkritje Higgsovega bozona je, na primer, zaznamovala besedna zveza »5 sigma«. Ta besedna zveza je povezana z verjetnostjo, da je odkritje Higgsovega bozona zgolj naključje. Pri tej vrednosti je tako verjetnost, da je to odkritje zgolj naključje, le še 1 : 3,5 milijona. Z več meritvami se to razmerje še večja, vendar nikoli ne bomo dosegli popolne gotovosti. Ta princip je skupen vsem področjem znanosti, zato v znanosti ne govorimo o neoporečnih dejstvih.

## Aktivnost 2: Testiranje modelov

Druga aktivnost je testni eksperiment, ki še dodatno izzove učence, da se spopadejo z ustvarjanjem hipotez in modelov. Ta aktivnost je primernejša za malce starejše učence, posebej tiste, ki že imajo izkušnje s prvo aktivnostjo, predstavljeno v tem članku. Učenci so znova razdeljeni v manjše skupine, vsaka skupina pa dobi svojo škatlo skrivnosti. Poleg tega znova dobijo pripomočke za zapisovanje svojih idej.

### 1. Teoretični modeli

Vsaka skupina skupaj s škatlo skrivnosti prejme tudi tri mogoče predloge, ki so ustvarjene na podlagi »teorije«. V primeru škatel z notranjo strukturo priporočamo, da ima poleg geometrijske zunanje oblike tudi skrito oviro, ki ni vnesena v nobeno izmed teoretičnih predlog (glej sliko 3). Učenci v skupinah škatle skrivnosti testirajo, da bi ugotovili, katera izmed teoretičnih predlog je pravilna.



**Slika 3:** (Levo) Tri oblike v modrem prikazujejo mogoče teoretične napovedi, ki jih prejmejo učenci. (Desno) Črno-bela oblika prikazuje mogočo notranjost škatle skrivnosti, ki se ne ujema z nobenim od levih predlogov.

Predvsem moderna znanost zelo pogosto izhaja iz teoretičnih napovedi. Tudi Higgsov bozon je bil teoretično napovedan kar 48 let, preden je bil prvič empirično zaznan.



## 2. Predlog za financiranje

Razlika med teoretičnimi napovedmi in opazovanjem kliče po novi raziskovalni opremi. Učencem je tako ponujena možnost, da zaprosijo za dodatno eksperimentalno opremo, na primer za magnet. V predlogu za financiranje morajo biti dobro opredeljeni problem, trenutna opazovanja ter načrt eksperimenta, ki bi ga izvedli s pomočjo nove eksperimentalne opreme. Ob tem naj učenci zapišejo tudi svoja predvidevanja o tem, kaj bodo našli z uporabo novega orodja.

Pisanje predlogov za financiranje je eden izmed osnovnih početij v znanosti. Strokovne komisije predloge proučijo in nato dodelijo financiranja raziskovalnim skupinam, katerih predlog je dovolj dodelan. Veliki eksperimenti, kot je veliki hadronski trkalnik, so popolnoma odvisni od dobre zasnove, saj le tako lahko pridobijo financiranje od držav članic in drugih institucij.

## 3. Prelomno odkritje

S pomočjo magneta učenci odkrijejo razliko med teorijo in eksperimentom. Učitelj ob tem spodbuja razmišljanje o tem, kaj to pomeni za predlagane teoretične modele. Pomembno je, da skozi diskusijo učenci ugotovijo, da novo odkritje nujno ne pomeni, da teoretični predlogi niso bili dobri. Nova znanstvena odkritja v resnici večinoma zgolj nadgrajujejo teorijo. Le redko nova odkritja teorijo popolnoma spremenijo.

Znanost je negotova. Do odkritja Brout-Englert-Higgsove mehanike ter Higgsovega polja v 60-ih letih prejšnjega stoletja je bila masa osnovna lastnost delcev. Odkritje Higgsovega bozona pa je dodatno potrdilo, da je masa delcev v resnici zgolj interakcija med delci in Higgsovim poljem. Jakost te interakcije določa, kako masiven je delec. Interakcija med delcem in Higgsovim poljem pa je še vedno povezana s samim delcem. Tako je masa še vedno osnovna lastnost, le njen izvor je z novim odkritjem bolj poznan.

## 4. Znanstvena konferenca

Vsaka skupina ustvari plakat na temo svojega raziskovanja. Plakat naj vsebuje vse potrebne elemente, vključno s teoretičnimi napovedmi, opisom eksperimenta, rezultati in predlogi za nadaljnje raziskovanje. Skupine imajo nato kratke, triminutne predstavitve plakatov, kjer lahko druge skupine njihova odkritja še dodatno kritično ovrednotijo.

Komuniciranje in skupinsko delo sta v znanosti ključnega pomena. Znanstveniki svoja odkritja redno objavljajo v okviru konferenc in znanstvenih revij. Pri tem jih drugi znanstveniki kritično ovrednotijo s strokovnimi recenzijami (angl. *peer review*) in predlagajo mogoče izboljšave. Tako je bilo odkritje Higgsovega bozona javno predstavljeno znanstveni skupnosti 4. julija 2012 v CERN, kjer sta dve skupini eksperimentalnih fizikov objavili svoje ugotovitve. Ker so njihove ugotovitve prepričale več tisoč znanstvenikov, zdaj temu pravimo znanstveno soglasje.

Na koncu naj učenci skupaj z učiteljem povzamejo vse vidike narave znanosti, ki so jih spoznali ob teh aktivnostih. Učitelj lahko na tem mestu poudari razliko med prvo in drugo aktivnostjo. Ravno razlika med tema aktivnostma je dober prikaz različnih znanstvenih metod, ki kljub razlikam vključujejo najpomembnejše vidike narave znanosti. Eksplicitna diskusija na to temo lahko učencem olajša prepoznavanja kakovostnih znanstvenih metod in lažjo kritično presojo znanstvenih dosežkov.

## Pripovedovanje zgodb

Pripovedovanje zgodb učinkovito prenaša informacije, že odkar ljudje govorimo. Zato ni presenetljivo, da je eden izmed načinov poučevanja narave znanosti ravno pripovedovanje zgodb. Navsezadnje ravno z zgodovinskimi pregledi velikih odkritij na primeru iz dejanske znanosti podamo vse različne vidike narave znanosti. V tem članku si za zgodbo izbiramo odkritje Higgsovega bozona, seveda pa lahko učitelji za zgodbo izberejo tudi katero koli drugo odkritje na fizikalnem ali katerem koli drugem področju. V zgodbi, ki jo opisujemo spodaj, vidiki narave znanosti niso eksplicitno podani, saj je besedilo v obliki, ki jo učitelji pri tretji aktivnosti brez prilagajanja dajo analizirati učencem.

## Aktivnost 3: Zgodba o odkritju Higgsovega bozona

Zadnja aktivnost je primerna predvsem za srednješolce, ki so že opravili prvi aktivnosti s škatlami skrivnosti. Pri tej aktivnosti učenci pregledajo zgodovinski oris odkritja Higgsovega bozona (spodaj) ter označijo primere različnih vidikov narave znanosti v besedilu. S to aktivnostjo učenci dodatno utrdijo svoje poznavanje narave znanosti ter se, upajmo, naučijo tudi česa iz fizike delcev, ki je učni načrt sicer ne vsebuje.

## Odkrivanje Higgsovega bozona

Spodaj opisana zgodba je kratek povzetek zgodovinskega dogajanja, ki je pripeljalo do odkritja Higgsovega bozona [19].

Vprašanje, ki se verjetno poraja marsikomu, je, zakaj so znanstveniki potrebovali toliko časa, da so odkrili Higgsov bozon, če pa je njegovo polje povsod in je njegova vloga tako pomembna? Na to vprašanje ni enostavnega odgovora. Vlogo Higgsovega polja bi lahko primerjali z vlogo bakterij v ekosistemu. Nahajajo se povsod in njihova vloga je zelo pomembna, vendar smo šele z izumom mikroskopa dejansko prišli do razumevanja in kategorizacije bakterij. Podobno je bilo Higgsovo polje dolga leta prezrto, ker ni bilo na voljo eksperimenta, ki bi razkril obnašanje osnovnih delcev v njegovi odsotnosti. Vendar so fiziki delcev brez Higgsovega polja naleteli na veliko oviro. Vsi so si želeli opisati sile, ki delujejo med delci, a jim tega ni in ni uspelo zapisati v eni, bolj ali manj elegantni enačbi, čeprav so se temu zelo močno približali s kombinacijo različnih teoretičnih predpostavk. Tako se je rodil tako imenovani standardni model fizike delcev.

A ta na videz popolni opis fizike delcev vendarle ni bil popoln. Enačba, ki je nastala iz dolgoletnega sodelovanja, namreč ni veljala za delce z maso. To seveda ne bi bil problem, če delci v resnici ne bi imeli mase. Tako pa še predobro vemo, da delci maso imajo. Ta problem je leta 1964 vzporedno rešila množica fizikov (dva izmed njih sta na sliki 4): Peter Higgs z Univerze v Edinburgu, Rober Brout in François Englert s Svobodne Univerze v Bruslju ter Gerald Guralnik, Carl R. Hagen in Tom Kibble z univerze Imperial College v Londonu. Omenjene skupine raziskovalcev takrat niso vedele druga za drugo, vendar so vsi prišli na podobno zamisel – kaj, če je vesolje zapolnjeno s posebnim poljem, ki na delce vpliva tako, da dobijo maso? Če polje vpliva na delce bolj, dobijo več mase, če pa nanje vpliva manj, je njihova masa manjša.



**Slika 4:** Peter Higgs in François Englert po razglasitvi odkritja Higgsovega bozona v CERN. [20]

Ideja se je prej omenjenim znanstvenikom porodila popolnoma naključno. Fiziki, ki proučujejo trdno snov, so za razlago superprevodnosti vključili pojav tako imenovanega spontanega zloma simetrije. Ta zlom simetrije je spodbudil val idej in nastal je mehanizem, ki ga danes poznamo kot Brout-Englert-Higgsov (BEH) mehanizem, ter s tem razlaga za Brout-Englert-Higgsovo (oziroma na kratko Higgsovo) polje.

Čeprav je ideja o BEH-mehanizmu požela veliko navdušenja med fiziki, pa je bila vseeno zgolj še ideja – nepreverjena hipoteza, ki je v tistem času ni bilo mogoče niti eksperimentalno testirati. Polje je namreč izjemno težko zaznati. Na srečo je imel Peter Higgs dobro idejo. Kadar pravilno vzbudimo katero drugo polje, lahko zaznamo polju lasten delec. Pri vzbujanju elektromagnetnega polja tako dobimo foton. Če torej Higgsovo polje dovolj močno vzbudimo, bomo morda zaznali delec, ki mu danes rečemo Higgsov bozon.

A žal to še ni rešilo vseh težav. Še vedno namreč nihče ni vedel, kako močno je to polje treba vzbuditi. Edino, kar so vedeli, je, da bo za testiranje te teorije potreben ogromen, izjemno kompleksen ter neverjetno drag eksperiment – vsekakor prevelik zalogaj za eno samo raziskovalno institucijo ali celo za eno samo državo. Tukaj v igro stopi CERN, mednarodna organizacija za raziskave na področju fizike delcev, ki združuje več deset držav, več sto ustanov in več tisoč strokovnjakov iz mnogih različnih področij. Po dolгих pogajanjih in pridobivanju financiranja so v CERN tako zgradili danes še vedno največji in najkompleksnejši eksperiment na svetu, veliki hadronski trkalnik (LHC, slika 5). Ta 27 kilometrov dolgi obroč, ki leži v povprečju sto metrov pod zemljo, pospešuje protone na skoraj svetlobno hitrost. Izjemno hitri protoni nato trčijo v izjemno velikih detektorjih delcev, kar včasih ravno dovolj vzbudi Higgsovo polje, da nastane Higgsov bozon.



**Slika 5:** Veliki hadronski trkalnik v CERN. Na sliki so tunel, ki leži sto metrov pod zemljo, in veliki superprevodni magneti, ki usmerjajo žarke protonov. [21]

Higsovega bozona pa žal ne moremo zaznati s prostimi očmi niti ga ne moremo slišati. Pravzaprav je tako nestabilen, da ga niti ne bi imeli časa zaznati, saj se izjemno hitro transformira v druge, stabilnejše delce. V detektorjih v CERN tako zaznavajo zgolj te dalj časa živeče delce, na podlagi katerih potem sklepamo o obstoju samega Higsovega bozona.

Žal pa ti delci nastajajo tudi zaradi drugih razlogov. Higsov bozon namreč ni edini delec, ki se še pred detektorjem transformira v druge delce. Pri identifikaciji delcev, ki so se transformirali še pred samo detekcijo, si tako fiziki pomagajo s teorijo. Ena izmed teoretičnih napovedi tako pravi, da se Higsov bozon sorazmerno pogosto transformira v dva fotona, kot vidimo na sliki 6. Vse, kar torej potrebujemo za identifikacijo Higsovega bozona, je identifikacija takšnega para fotonov. Seveda pa znova ne gre vse tako gladko. Tudi mnogi drugi delci iz ozadja se namreč transformirajo v fotone.



**Slika 6:** Vizualizacija trka dveh protonov v detektorju CMS, pri katerem nastaneta dva visokoenergijska fotona, prikazana z zeleno barvo. Slika bi lahko prikazovala delce, ki so nastali po transformaciji Higsovega bozona, vendar tega ne moremo vedeti brez statistične analize. [22]

Postavlja pa se vprašanje – kdaj lahko fiziki rečejo, da je nek signal res posledica transformacije Higsovega bozona in ne zgolj drugih transformacij iz ozadja? Tukaj si pomagamo s statističnimi orodji. Če izmerjeni podatki močno odstopajo od tega, kar bi sicer pričakovali od ozadja samega, lahko z določeno verjetnostjo trdimo, da ti podatki nakazujejo obstoj nekega (novega) delca. V znanosti je pogosto meja, nad katero lahko kaj takšnega trdimo, postavljena na tako imenovan »5 sigma«. Ta meja nam pove, kdaj je verjetnost, da smo nekaj izmerili popolnoma naključno, manjša od  $1 : 3,5$  milijona. To magično mejo sta eksperimenta ATLAS in CMS v CERN presegla 4. julija 2012 (oziroma nekaj dni prej), ko so v glavnem avditoriju v CERN razglasili odkritje Higsovega bozona.

Pod znanstvena članka, ki sta v svet ponesla vse podrobnosti o odkritju Higsovega bozona, se je podpisalo več tisoč znanstvenikov, znanstvenic, inženirjev, inženirk

in preostalih strokovnjakov, ki so aktivno pripomogli k temu odkritju. Le leto pozneje pa je to odkritje prineslo Nobelovo nagrado tudi prvotnima avtorjema teorije Higsovega polja, Petru Higgsu in Françoisu Englertu.

Zgodbe pa še ni konec. Kot pravi Giacinto Piacquadio, eden od vodij Higsove skupine pri eksperimentu ATLAS, »ko odkriješ nekaj novega, moraš natančno razumeti, kaj je to, kar si odkril«. Čeprav je od odkritja delca minilo že deset let, nam lahko nadaljnje raziskovanje posredno daje namige za odkrivanje tako imenovane »nove fizike«, torej fizikalnih procesov ali delcev, ki jih do zdaj še ne poznamo. Kolaboraciji ATLAS in CMS tako iščeta »nevidne razpade« Higsovega delca, pri katerih se ta transformira v delce, ki jih detektorji ne morejo zaznati. Ti nevidni delci bi lahko bili gradniki temne snovi. Prav tako bi lahko natančne meritve interakcij Higsovega bozona s samim sabo in z drugimi delci, ki bi odstopale od teoretičnih napovedi, lahko namigovala na obstoj dodatnih Higsovih bozonov. S tem bi morda celo podale odgovor na eno izmed temeljnih vprašanj fizike osnovnih delcev: zakaj so osnovni delci razporejeni v točno tri generacije s tako različnimi masami? Pri omenjenih raziskavah v okviru kolaboracije ATLAS sodeluje tudi skupina slovenskih znanstvenikov z odseka za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev Instituta Jožef Stefan in morda, čez nekaj let, tudi kdo izmed vas.

## Zaključek

Razumevanje narave znanosti je ključnega pomena za razumevanje znanosti, vendar tega večina učnih načrtov ne vključuje na primeren način. V tem članku smo predstavili tri aktivnosti, s pomočjo katerih lahko učitelji bolje vključijo naravo znanosti v svoje učne ure. Aktivnosti, ki smo jih predstavili, so lahko prilagojene učencem v osnovnih in srednjih šolah z različnim predznanjem. Pri prvih dveh aktivnostih smo uporabili škatle skrivnosti s skrito notranjo strukturo, ki jih učitelji brez težav zamenjajo za katero koli drugo vrsto škatel skrivnosti. Ti aktivnosti prav tako nista omejeni na pouk fizike, brez težav ju lahko uporabimo tudi pri drugih predmetih (na primer naravoslovje ali kemija). Zadnja aktivnost je malce kompleksnejša in potrebuje določeno predznanje o različnih vidikih narave znanosti. Ravno tako je kontekst fizike delcev kompleksnejši in zato primernejši za starejše dijake. Seveda pa lahko kontekst in primere v vseh treh aktivnostih enostavno zamenjamo za kateri koli drug sodobni raziskovalni projekt, vse od gravitacijskih valov, razvoja cepiv do globalnega segrevanja. Učitelji, ki bi si želeli dodatne popestritve aktivnosti, pa lahko k sodelovanju povabijo tudi kakšnega znanstvenika, ki lahko iz prve roke razpravlja o znanstvenih metodah in naravi znanosti. V vsakem primeru pa naj se diskusija konča na pozitivno noto: znanost ni gotova. Prihodnost se bo gotovo še marsikako spremenila – in morda bo kdo izmed tistih, ki jo spremeni, ravno eden izmed vaših učencev.



## Viri in literatura

- [1] <http://cds.cern.ch/record/1459503> (April, 2022)
- [2] Holbrook, J., in Rannikmae, M. (2007). The nature of science education for enhancing scientific literacy. *International Journal of science education*, 29(11), 1347–1362.
- [3] Lederman, N. G. (2007). Nature of science: Past, present, and future. In S.K. Abell & N. G. Lederman (ur.), *Handbook of research on science education* (831–880). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- [4] Abd-El-Khalick, F. (2012). „Examining the sources for our understandings about science: Enduring confluences and critical issues in research on nature of science in science education.“ *International journal of science education* 34(3): 353–374.
- [5] Park, W., Yang, S., in Song, J. (2019). When modern physics meets nature of science. *Science & Education*, 28(9), 1055–1083.
- [6] Abd-El-Khalick, F., in Lederman, N. G. (2000). The influence of history of science courses on students' views of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(10), 1057–1095.
- [7] Lederman, N. G. (2006). Syntax of nature of science within inquiry and science instruction. V L. B. Flick in N. G. Lederman (ur.), *Scientific inquiry and nature of science* (301–317). Dordrecht: Springer.
- [8] Abd-El-Khalick, F. (2012). „Examining the sources for our understandings about science: Enduring confluences and critical issues in research on nature of science in science education.“ *International journal of science education* 34(3): 353–374.
- [9] Cápay, M., in Magdin, M. (2013). Tasks for Teaching Scientific Approach Using the Black Box Method. Proceedings of the European Conference on e-Learning, ECEL.
- [10] Lederman, N., in Abd-El-Khalick, F. (2002). Avoiding De-Natured Science: Activities that Promote Understandings of the Nature of Science, *The Nature of Science in Science Education*.
- [11] Passmore, C. M., in Svoboda, J. (2012). Exploring Opportunities for Argumentation in Modelling Classrooms, *International Journal of Science Education*, 34(10), 1535–1554.
- [12] Pralavorio, C., Saison-Marsollier, S., Petit, S., Dubois, L., Gaumer, O. (2018). Dans la peau des scientifiques, 8th edition, [http://voisins.cern/sites/default/files/Livret\\_Dans%20la%20peau%20de%20scientifiques\\_VERSION%20FINALE%202018-2019.pdf](http://voisins.cern/sites/default/files/Livret_Dans%20la%20peau%20de%20scientifiques_VERSION%20FINALE%202018-2019.pdf)
- [13] Science Museum Group (2012). Mystery Boxes, <https://learning.sciencemuseumgroup.org.uk/wp-content/uploads/2020/04/SMG-Academy-Mystery-Boxes.pdf>, <https://www.youtube.com/watch?v=hud8SPCcfu0>.
- [14] Lederman, J., Bartels, S., Lederman, N. in Gnanakkan, D. (2014). Demystifying Nature of Science. *Science & Children*, 52, 40–45.
- [15] Douglas, L. (2014). *Inquire Within: Implementing Inquiry- and Argument-Based Science Standards in Grades 3-8. Third Edition*. Corwin Press. ISBN: 1452299285.
- [16] Miller, S. (2014). Modeling the Nature of Science with the Mystery Tube. *The Physics Teacher*, 52, 548.
- [17] Krell M., in Hergert S. (2019). *The Black Box Approach: Analyzing Modeling Strategies*. V: Upmeier zu Belzen A., Krüger D., van Driel J. (ur.) *Towards a Competence-Based View on Models and Modeling in Science Education. Models and Modeling in Science Education*, 12. Springer, Cham.
- [18] <https://scoollab.web.cern.ch/3d-printable-mystery-box> (April, 2022)
- [19] Castillo, L. (2014). The Search and Discovery of the Higgs Boson. Institute of Physics. <https://iop-science-iop-org.ezproxy.cern.ch/book/978-1-6817-4078-2>
- [20] <https://cds.cern.ch/record/1459634/> (April, 2022)
- [21] <https://cds.cern.ch/record/2673004> (April, 2022)
- [22] <https://cds.cern.ch/record/2736135> (April, 2022)