

IZDAJA DRUŠTVO MATEMATIKOV, FIZIKOV IN ASTRONOMOV SLOVENIJE

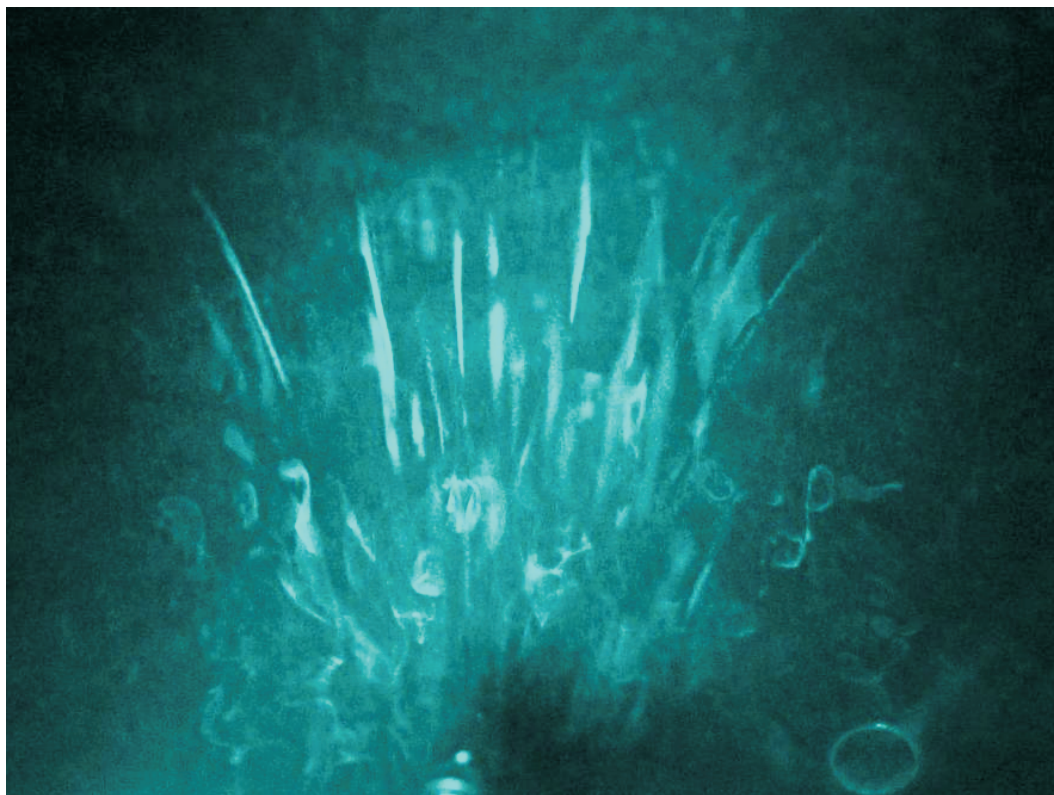
ISSN 0473-7466

2011

Letnik 58

2

OBZORNIK ZA MATEMATIKO IN FIZIKO



OBZORNIK ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

Glasilno Društva matematikov, fizikov in astronomov Slovenije
Ljubljana, MAREC 2011, letnik 58, številka 2, strani 41–92

Naslov uredništva: DMFA–založništvo, Jadranska ulica 19, p. p. 2964, 1001 Ljubljana
Telefon: (01) 4766 553, 4232 460 **Telefaks:** (01) 4232 460, 2517 281 **Elektronska pošta:** zaloznistvo@dmfa.si **Internet:** <http://www.obzornik.si/> **Transakcijski račun:** 03100–1000018787 **Mednarodna nakazila:** SKB banka d.d., Ajdovščina 4, 1513 Ljubljana **SWIFT (BIC):** SKBASI2X **IBAN:** SI56 0310 0100 0018 787

Uredniški odbor: Marko Petkovšek (glavni urednik), Sašo Strle (urednik za matematiko in odgovorni urednik), Aleš Mohorič (urednik za fiziko), Mirko Dobovišek, Irena Drevenšek Olenik, Damjan Kobal, Peter Legiša, Petar Pavešić, Marko Razpet, Nada Razpet, Peter Šemrl, Matjaž Zaveršnik (tehnični urednik).

Jezikovno pregledal Janez Juvan.

Računalniško stavila in oblikovala Tadeja Šekoranja.

Natisnila tiskarna COLLEGIUM GRAPHICUM v nakladi 1250 izvodov.

Člani društva prejemajo Obzornik brezplačno. Celoletna članarina znaša 21 EUR, za druge družinske člane in študente pa 10,50 EUR. Naročnina za ustanove je 35 EUR, za tujino 40 EUR. Posamezna številka za člane stane 3,19 EUR, stare številke 1,99 EUR.

DMFA je včlanjeno v Evropsko matematično društvo (EMS), v Mednarodno matematično unijo (IMU), v Evropsko fizikalno društvo (EPS) in v Mednarodno združenje za čisto in uporabno fiziko (IUPAP). DMFA ima pogodbo o recipročnosti z Ameriškim matematičnim društvom (AMS).

Revija izhaja praviloma vsak drugi mesec. Sofinancirata jo Javna agencija za knjigo Republike Slovenije ter Ministrstvo za šolstvo in šport.

© 2011 DMFA Slovenije – 1836

Poštnina plačana pri pošti 1102 Ljubljana

NAVODILA SODELAVCEM OBZORNIKA ZA ODDAJO PRISPEVKOV

Revija Obzornik za matematiko in fiziko objavlja izvirne znanstvene in strokovne članke iz matematike, fizike in astronomije, včasih tudi kak prevod. Poleg člankov objavlja prikaze novih knjig s teh področij, poročila o dejavnosti Društva matematikov, fizikov in astronomov Slovenije ter vesti o drugih pomembnih dogodkih v okviru omenjenih znanstvenih ved. Prispevki naj bodo zanimivi in razumljivi širšemu krogu bralcev, diplomantov iz omenjenih strok.

Članek naj vsebuje naslov, ime avtorja (oz. avtorjev), sedež institucije, kjer avtor(ji) dela(jo), izvleček v slovenskem jeziku, naslov in izvleček v angleškem jeziku, klasifikacijo (MSC oziroma PACS) in citirano literaturo. Slike in tabele, ki naj bodo oštevilčene, morajo imeti dovolj izčrpen opis, da jih lahko večinoma razumemo tudi ločeno od besedila. Avtorji člankov, ki želijo objaviti slike iz drugih virov, si morajo za to sami priskrbeti dovoljenje (copyright). Prispevki so lahko oddani v računalniški datoteki PDF ali pa natisnjeni enostransko na belem papirju formata A4. Zaželen velikost črk je 12 pt, razmik med vrsticami pa vsaj 18 pt.

Prispevke pošljite odgovornemu uredniku ali uredniku za matematiko oziroma fiziko na zgoraj napisani naslov uredništva. Vsak članek se praviloma pošlje dvema anonimnima recenzentoma, ki morata predvsem natančno oceniti, kako je obravnavana tema predstavljena, manj pomembna pa je originalnost (in pri matematičnih člankih splošnost) rezultatov. Če je prispevek sprejet v objavo, potem urednik prosi avtorja še za izvirne računalniške datoteke. Le-te naj bodo praviloma napisane v eni od standardnih različic urejevalnikov \TeX oziroma \LaTeX , kar bo olajšalo uredniški postopek.

Avtor se z oddajo članka strinja tudi z njegovo kasnejšo objavo v elektronski obliki na internetu.

LOGISTIČNI POLINOMI

MARKO RAZPET

Pedagoška fakulteta v Ljubljani

Univerza v Ljubljani

Math. Subj. Class. (2010): 11B68, 11B73, 11B83.

V prispevku pokažemo, kako normalizirana logistična funkcija generira zaporedje polinomov. Obravnavamo nekatere njihove lastnosti in povezave z Bernoullijevimi in Stirlingovimi števili.

LOGISTIC POLYNOMIALS

It is shown how the normalized logistic function generates a sequence of polynomials. Some properties of these polynomials are discussed and some relations with Bernoulli and Stirling numbers are given.

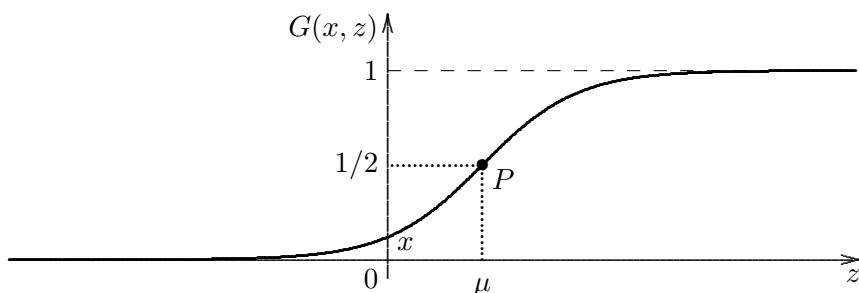
Uvod

V matematiki se pogosto dogaja, da pri reševanju nekega problema opazimo kakšno drobno zanimivost, ki je nismo pričakovali. Če se vanjo malo poglobimo, pa nam morda uspe najti še kakšno presenečenje. Tak primer je preprosta logistična funkcija $t \mapsto y(t)$, s katero opišemo rast populacije pri določenih pogojih. Običajno jo obravnavamo že čisto na začetku pri navadnih diferencialnih enačbah prvega reda (na primer v [5]) kot rešitev logistične diferencialne enačbe $y' = Ky(a - y)$. Navadno iščemo tako rešitev, ki zadošča nekemu začetnemu pogoju $y(0) = y_0 \in (0, a)$. Pri tem sta K in a pozitivni konstanti (nekaj več o tem v [5, 6]). Graf logistične funkcije imenujemo *logistična krivulja*. Rešitev se seveda spreminja, če spreminjamo začetni pogoj. V prispevku bomo spoznali, da je pri obravnavi logistične funkcije smiselno vpeljati zaporedje polinomov, ki jih imenujemo *logistični polinomi* in jih po svoje porodi ali generira ravno logistična funkcija.

V teoriji diferencialnih enačb drugega reda poznamo veliko primerov polinomskih zaporedij. Spomnimo se samo na klasične ortogonalne polinome, na primer na Legendrove, Hermitove in Laguerrove, ki imajo rodovne funkcije in tričlene linearne rekurzije. Logistični polinomi pa imajo bolj zapleteno rekurzijo, kar še posebej pritegne našo pozornost. Pojavijo se tudi pri logistični verjetnostni porazdelitvi (glej [2]).

S preprosto linearno zamenjavo spremenljivk $t \rightarrow z = \alpha t$ in $y \rightarrow Y = \beta y$ lahko logistično diferencialno enačbo zaradi udobnejše obravnave normaliziramo tako, da dobi obliko $Y' = Y(1 - Y)$, začetni pogoj pa $Y(0) = x \in (0, 1)$. Očitno ima enačba ločljivi spremenljivki in jo lahko rešimo z ločevanjem spremenljivk in integracijo. Še elegantneje jo lahko rešimo z uvedbo nove funkcije $U = 1/Y$, ki zadošča enostavnejši diferencialni enačbi $U' = 1 - U$ s splošno rešitvijo $U(z) = 1 + C \exp(-z)$. Iz začetnega pogoja $U(0) = 1/x$ hitro dobimo $C = (1 - x)/x$ in

$$U(z) = \frac{x + (1 - x) \exp(-z)}{x}, \quad Y(z) = \frac{x}{x + (1 - x) \exp(-z)}, \quad z \in \mathbb{R}.$$



Slika 1. Normalizirana logistična krivulja in njen prevoj.

Ker bomo na funkcijo Y gledali tudi kot na funkcijo začetne vrednosti x , bomo pisali $Y(z) = G(x, z)$ in funkcijo G obravnavali kot funkcijo spremenljivk $x \in (0, 1)$ in $z \in \mathbb{R}$. Na pasu $(0, 1) \times \mathbb{R}$ je G očitno zvezna funkcija in ima tam zvezne vse parcialne odvode poljubnega reda.

Spremljajoči polinomi

V nadaljevanju bomo obravnavali normalizirano logistično funkcijo G kot funkcijo spremenljivk x in z , torej

$$(x, z) \mapsto G(x, z) = \frac{x}{x + (1 - x) \exp(-z)}.$$

Očitno je $G(x, 0) = x$, $\lim_{z \rightarrow -\infty} G(x, z) = 0$ in $\lim_{z \rightarrow \infty} G(x, z) = 1$ za vsak $x \in (0, 1)$. Normalizirane logistične funkcije $z \mapsto G(x, z)$ pri različnih

$x \in (0, 1)$ so zvezne in naraščajoče ter se razlikujejo za vzporedni premik vzdolž abscise. Ustrezne normalizirane logistične krivulje so med seboj skladne. Vse te funkcije zadoščajo normalizirani logistični diferencialni enačbi z začetnim pogojem

$$\frac{\partial G}{\partial z} = G(1 - G), \quad G(x, 0) = x. \quad (1)$$

Neposredno iz (1) dobimo z odvajanjem

$$\frac{\partial^2 G}{\partial z^2} = (1 - 2G) \frac{\partial G}{\partial z} = G(1 - G)(1 - 2G),$$

iz česar takoj ugotovimo, da ima normalizirana logistična krivulja pri fiksnem x svoj edini prevoj v točki $P(\mu, 1/2)$, pri čemer je $\mu = \mu(x) = \log((1 - x)/x)$. Za $x = 1/2$ je $\mu = 0$, za $0 < x < 1/2$ je $\mu > 0$, za $1/2 < x < 1$ pa $\mu < 0$.

Izrek 1. *Funkcija G ima v okolici točke $z = 0$ razvoj v potenčno vrsto oblike*

$$G(x, z) = \frac{x}{x + (1 - x) \exp(-z)} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{p_n(x)}{n!} z^n, \quad (2)$$

pri čemer so p_n polinomi, ki imajo nelinearno rekurzijo

$$p_{n+1}(x) = p_n(x) - \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} p_k(x) p_{n-k}(x), \quad p_0(x) = x. \quad (3)$$

Stopnja polinoma p_n je $n + 1$, vsi njegovi koeficienti pa so cela števila. Za vsak $n \geq 1$ je $p_n(0) = p_n(1) = 0$.

Dokaz. Uporabimo splošno obliko členov Taylorjeve vrste in zapišemo enakost

$$p_n(x) = \frac{\partial^n G}{\partial z^n}(x, 0), \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

S primerjavo koeficientov pri potenci z^n na obeh straneh nelinearne enačbe (1), kateri funkcija G zadošča, dobimo rekurzijo (3). Ker je $p_0(x) = x$, lahko induktivno z uporabo rekurzije sklepamo, da ima polinom p_n stopnjo $n + 1$ in so vsi njegovi koeficienti cela števila. Iz rekurzije prav tako dobimo, da sta 0 in 1 ničli polinomov p_n za vsak $n \geq 1$. ■

Polinom p_n na intervalu $(0, 1)$ zato opisuje obnašanje normalizirane logistične krivulje v presečišču z ordinatno osjo. Polinomom p_n lahko seveda definicijsko območje razširimo z intervala $(0, 1)$ na \mathbb{R} .

Primer 1. Z rekurzijo (3) hitro najdemo nekaj začetnih polinomov p_n :

$$\begin{aligned} p_1(x) &= x(1-x), \\ p_2(x) &= x(1-x)(1-2x), \\ p_3(x) &= x(1-x)(1-6x+6x^2), \\ p_4(x) &= x(1-x)(1-14x+36x^2-24x^3), \\ p_5(x) &= x(1-x)(1-30x+150x^2-240x^3+120x^4). \end{aligned}$$

Kasneje nam bodo pomagali najti prvih nekaj logističnih polinomov.

V naslednjem izreku nastopajo Bernoullijeva števila B_n , ki jih navadno definiramo z rodovno funkcijo

$$\frac{z}{\exp(z) - 1} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n}{n!} z^n, \quad |z| < 2\pi.$$

Več o Bernoullijevih številih lahko preberemo na primer v [1, 3, 4, 6].

Izrek 2. Za vsako celo število $k \geq 1$ velja

$$p_{2k}(1/2) = 0, \quad p_{2k-1}(1/2) = \frac{B_{2k}}{2k} (2^{2k} - 1), \quad (4)$$

posebej pa je $p_0(1/2) = 1/2$.

Dokaz. Najprej $G(x, z)$ izrazimo s pomočjo parametra $\mu = \log((1-x)/x)$, torej

$$G(x, z) = \frac{1}{1 + \exp(\mu - z)} = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{th} \frac{z - \mu}{2} \right). \quad (5)$$

Ker je za $x = 1/2$ parameter $\mu = 0$, dobimo po eni strani iz (5)

$$G(1/2, z) = \frac{1}{1 + \exp(-z)} = \frac{1}{2} (1 + \operatorname{th}(z/2)) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{p_n(1/2)}{n!} z^n. \quad (6)$$

Po drugi strani pa velja znani razvoj funkcije th (hiperbolični tangens) v potenčno vrsto (glej na primer [1]), in sicer

$$\frac{1}{2} \operatorname{th}(z/2) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_{2n}}{(2n)!} (2^{2n} - 1) z^{2n-1}, \quad |z| < \pi, \quad (7)$$

tako da s primerjavo koeficientov pri potenci z^n v (6) in (7) takoj dobimo za $k \geq 1$ relaciji (4). ■

Radi pa bi našli enostavnejši zapis koeficientov polinomov p_n . Pri tem uporabimo nekaj preprostih zamenjav spremenljivk in nekaj znanih razvojov funkcij v potenčne vrste. Videli bomo, da koeficiente polinomov p_n lahko izrazimo s Stirlingovimi števili druge vrste $S(n, k)$. Pomagala nam bodo tudi Stirlingova števila prve vrste $s(n, k)$. Več o Stirlingovih številih obeh vrst najdemo v ustrezni matematični literaturi, denimo v [1, 4].

Izrek 3. *Za vsako nenegativno celo število n velja enakost*

$$p_n(x) = \sum_{k=0}^n (-1)^k k! S(n+1, k+1) x^{k+1}. \quad (8)$$

Dokaz. Najprej naredimo zamenjavo $z \mapsto \log(1+z)$ v (2) in s tem dobimo

$$\frac{x(1+z)}{1+xz} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{p_n(x)}{n!} \log^n(1+z). \quad (9)$$

Ker pa obstaja za vse dovolj majhne z znani razvoj

$$\frac{1}{n!} \log^n(1+z) = \sum_{k=n}^{\infty} \frac{s(k, n)}{k!} z^k$$

ter znamo razviti, prav tako za dovolj majhne z , funkcijo $z \mapsto 1/(1+xz)$ v geometrijsko vrsto, dobimo po zamenjavi vrstnega reda seštevanja iz (9)

$$\frac{x(1+z)}{1+xz} = x + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k (x^{k+1} - x^k) z^k = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{k!} \sum_{n=0}^k s(k, n) p_n(x).$$

S tem smo za razlike sosednjih potenc našli razvoj

$$x^{k+1} - x^k = \frac{(-1)^k}{k!} \sum_{n=1}^k s(k, n) p_n(x), \quad k \geq 1.$$

Ker za Stirlingova števila velja enakost

$$\sum_{k=m}^n S(n, k) s(k, m) = \sum_{k=m}^n s(n, k) S(k, m) = \delta_{mn},$$

dobimo še razvoj v obratni smeri, namreč

$$p_n(x) = \sum_{k=1}^n (-1)^k k! S(n, k) (x^{k+1} - x^k), \quad n \geq 1.$$

Pri tem je δ_{mn} Kroneckerjev simbol. Z osnovno rekurzijo Stirlingovih števil druge vrste, to je $S(n+1, k+1) = S(n, k) + (k+1)S(n, k+1)$ (glej na primer [1]), najdemo polinome p_n eksplicitno v obliki (8). ■

S tem smo našli za polinome p_n tako obliko, iz katere so razvidni njihovi koeficienti. Iz (8) ponovno razberemo, da je p_n polinom stopnje $n+1$, njegov odvod p'_n pa stopnje n .

Logistični polinomi

Radi pa bi imeli lepše, pravo polinomsko zaporedje, in sicer táko, v katerem bi n -ti polinom imel stopnjo n za vsak $n \geq 0$, tako kot pri klasičnih ortogonalnih polinomih. Ponuja se kar samo od sebe.

Izrek 4. *Za vsako nenegativno celo število n je $P_n = p'_n$ polinom stopnje n . Zaporedje P_0, P_1, P_2, \dots je pravo polinomsko zaporedje, ki ima rodovno funkcijo*

$$H(x, z) = \frac{\partial G}{\partial x}(x, z) = \frac{\exp(-z)}{(x + (1-x)\exp(-z))^2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{P_n(x)}{n!} z^n, \quad (10)$$

veljata pa tudi zapisa $P_n(x) = p_{n+1}(x)/p_1(x)$ in

$$P_n(x) = \sum_{k=0}^n (-1)^k (k+1)! S(n+1, k+1) x^k.$$

Za vsak indeks n veljata enakosti $P_n(0) = 1$ in $P_n(1) = (-1)^n$.

Dokaz. Ker je

$$\frac{\partial G}{\partial z}(x, z) = \frac{x(1-x)\exp(-z)}{(x + (1-x)\exp(-z))^2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{p_{n+1}(x)}{n!} z^n$$

in

$$\frac{\partial G}{\partial x}(x, z) = \frac{\exp(-z)}{(x + (1-x)\exp(-z))^2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{p'_n(x)}{n!} z^n,$$

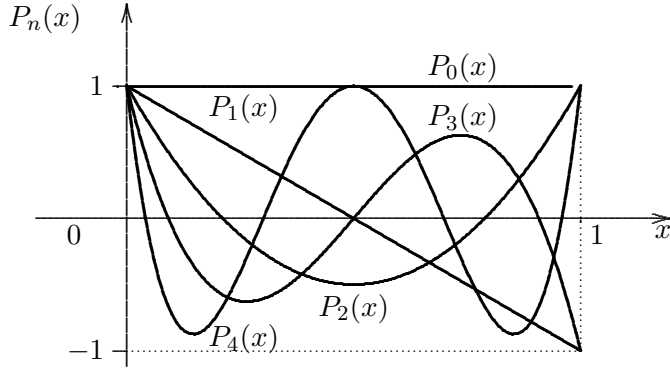
velja enakost

$$\frac{\partial G}{\partial z} = p_1 \frac{\partial G}{\partial x},$$

iz katere dobimo

$$p_{n+1} = p_1 p'_n = p_1 P_n, \quad n \geq 0. \quad (11)$$

Logistični polinomi



Slika 2. Grafi logističnih polinomov $P_n(x)$ za $0 \leq n \leq 4$ na intervalu $[0, 1]$.

Zapis polinoma P_n s Stirlingovimi števili $S(n, k)$ dobimo iz (8). Nazadnje vstavimo $x = 0$ in $x = 1$ v (10) in dobimo $P_n(0) = 1$ in $P_n(1) = (-1)^n$ za vsak $n \geq 0$. ■

Primer 2. Zaporedje logističnih polinomov P_n se prične tako:

$$\begin{aligned} P_0(x) &= 1, \\ P_1(x) &= 1 - 2x, \\ P_2(x) &= 1 - 6x + 6x^2, \\ P_3(x) &= 1 - 14x + 36x^2 - 24x^3, \\ P_4(x) &= 1 - 30x + 150x^2 - 240x^3 + 120x^4. \end{aligned}$$

Opazimo, da so njihovi koeficienti cela števila in da je vodilni koeficient polinoma P_n enak $(-1)^n(n+1)!$, kar se da dokazati z metodo popolne indukcije.

Avtorja v [2] pravita polinomom P_n *logistični polinomi*. Očitno polinomi P_0, P_1, \dots, P_n sestavljajo bazo prostora polinomov, katerih stopnje ne presegajo n .

Izrek 5. Za vsako nenegativno celo število n velja rekurzija

$$P_{n+1} = (p_1 P_n)',$$

za vsako pozitivno celo število n pa rekurzija

$$(-1)^n P_n(x) = 1 - (1-x) \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k \binom{n+1}{k+1} P_k(x). \quad (12)$$

Dokaz. Ker je po (11) $p_{n+2} = p_1 p'_{n+1}$ za $n \geq 0$, takoj dobimo prvo rekurzijo po izreku 4. Velja namreč

$$P_{n+1} = \frac{p_{n+2}}{p_1} = p'_{n+1} = (p_1 P_n)'.$$

Z drugo pa je nekoliko več dela. Začnimo z razvojem (2), ki nam da enakost

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{p_n(x)}{n!} z^n \left[x + (1-x) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} z^n \right] = x.$$

Po pravilu za množenje potenčnih vrst in s primerjavo koeficientov pri potenci z^n na obeh straneh enačbe za vsak $n \geq 1$ ugotovimo, da imajo polinomi p_n rekurzijo

$$x p_n(x) = (x-1) \sum_{k=0}^n (-1)^{n-k} \binom{n}{k} p_k(x), \quad n \geq 1. \quad (13)$$

Zvišajmo indeks n za 1 in pišimo

$$\begin{aligned} x p_{n+1}(x) &= (x-1) \sum_{k=0}^{n+1} (-1)^{n+1-k} \binom{n+1}{k} p_k(x) = \\ &= (-1)^n (1-x) \left(p_0(x) - \sum_{k=1}^{n+1} (-1)^{-(k-1)} \binom{n+1}{k} p_k(x) \right) = \\ &= (-1)^n \left(p_1(x) - (1-x) \sum_{k=0}^n (-1)^k \binom{n+1}{k+1} p_{k+1}(x) \right). \end{aligned}$$

Ker je $P_k(x) = p_{k+1}(x)/p_1(x)$ za $k \geq 0$, dobimo od tod enakost

$$(-1)^n x P_n(x) = 1 - (1-x) \sum_{k=0}^n (-1)^k \binom{n+1}{k+1} P_k(x),$$

iz katere po preureditvi sledi (12). ■

Sedaj dokažimo simetrijsko lastnost polinomov p_n in P_n glede na točko $x = 1/2$. Iz opazovanj grafov polinomov na sliki 2 domnevamo, da so polinomi $x \mapsto P_n(x - 1/2)$ za sode n sode, za lihe n pa lihe funkcije. To res drži, kot trdi naslednji izrek:

Izrek 6. *Za vsako pozitivno celo število n velja enakost*

$$p_n(1-x) = (-1)^{n+1}p_n(x),$$

za vsako nenegativno celo število n pa enakost

$$P_n(1-x) = (-1)^n P_n(x).$$

Za $n \geq 1$ ležijo ničle polinomov p_n in P_n simetrično glede na točko $x = 1/2$.

Dokaz. Pričnemo z zamenjavo $x \rightarrow 1-x$ in $z \rightarrow -z$ v izrazu (2) in dobimo

$$xG(1-x, -z) = \frac{x(1-x)}{1-x+x\exp(z)} = (1-x)\exp(-z)G(x, z),$$

nato pa z znanim razvojem (2) še

$$x \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{p_n(1-x)}{n!} z^n = (1-x) \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{p_n(x)}{n!} z^n \right] \left[\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{n!} z^n \right].$$

Po množenju potenčnih vrst in primerjavi koeficientov pri potenci z^n imamo za $n \geq 1$ z upoštevanjem enakosti (13)

$$(-1)^n x p_n(1-x) = (1-x) \sum_{k=0}^n (-1)^{n-k} \binom{n}{k} p_k(x) = -x p_n(x).$$

Iz tega sledi prva enakost v izreku. Drugo pa dobimo z upoštevanjem zveze $P_n(x) = p_{n+1}(x)/p_1(x)$. ■

Končajmo z izrekom, ki pove, kako so še logistični polinomi povezani z logistično funkcijo.

Izrek 7. *Za vsako pozitivno celo število n velja formula*

$$\frac{\partial^n G}{\partial z^n} = p_n \circ G = G(1-G)(P_{n-1} \circ G), \quad (14)$$

pri čemer pomeni \circ znak običajnega sestavljanja funkcij. Vse odvode $\partial^n G/\partial z^n$ lahko torej izrazimo kot sestavljenko polinoma in funkcije G .

Dokaz. Dokazujemo s principom popolne indukcije. Očitno je formula (14) pravilna za $n = 1$. Zaradi (1) je namreč

$$\frac{\partial G}{\partial z} = p_1 \circ G = G(1 - G)(P_0 \circ G).$$

Predpostavimo, da je (14) pravilna za naravno število n . Ker velja enačba (11), imamo

$$\begin{aligned} \frac{\partial^{n+1} G}{\partial z^{n+1}} &= (p'_n \circ G) \frac{\partial G}{\partial z} = \frac{p_{n+1} \circ G}{p_1 \circ G} \cdot (p_1 \circ G) = \\ &= p_{n+1} \circ G = (p_1 \circ G)(P_n \circ G) = G(1 - G)(P_n \circ G). \end{aligned}$$

Zatorej je relacija (14) pravilna za vsako nenegativno celo število n . ■

Sklep

Videli smo, kako prek logistične diferencialne enačbe pridemo do polinomskega zaporedja in kakšne so povezave z Bernoullijevimi in Stirlingovimi števili. Za $n = 1, 2, 3$ ima polinom P_n ravno n enostavnih ničel na intervalu $(0, 1)$. Predvidevamo, da ima vsak polinom P_n za $n \geq 1$ tam natanko n enostavnih ničel. Najbrž se te domneve ne da dokazati tako kot za klasične ortogonalne polinome. Lahko pa bi bila predmet nove raziskave.

LITERATURA

- [1] M. Abramowitz in I. Stegun, *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables*, Dover Publications, New York, 1972.
- [2] E. O. George in C. C. Rousseau, *On the logistic midrange*, Ann. Inst. Statist. Math. **39** (1987), Part A, 627–635.
- [3] I. S. Gradshteyn in I. M. Ryzhik, *Tables of integrals, sums and products*, ur. A. Jeffrey, Academic Press, New York, 1994.
- [4] J. Grasselli, *Enciklopedija števil*, DMFA – založništvo, Ljubljana, 2008.
- [5] F. Križanič, *Navadne diferencialne enačbe in variacijski račun*, DZS, Ljubljana, 1974.
- [6] M. Razpet, *Logistična porazdelitev*, Obzornik mat. fiz. **57** (2010), št. 3, 81–96

POGOVOR S PROF. ČRTOMIROM ZUPANČIČEM

Črtomir Zupančič, rojen 1928, je diplomiral v Ljubljani leta 1952, kjer je takoj zatem na *Inštitutu Jožef Stefan* začel svojo raziskovalno pot fizika. Sledilo je izpopolnjevanje na *Inštitutu Nielsa Bohra* v Københavnu, kjer je v letih 1952–54 že sodeloval pri pomembnih odkritjih. Čas od 1960 do 1962 je prebil na *Brookhaven National Laboratory* v ZDA. Tam je raziskoval mehanizem jedrskih reakcij pri nerelativističnih energijah in sodeloval pri prvih meritvah delcev, ki jih sevajo različne tarče pri obstreljevanju s protoni z energijo 30 GeV v novozgrajenem pospeševalniku AGS (*alternating gradient synchrotron*). Pri tem je skupaj z Arthurjem Schwarzschildom sodeloval pri odkritjih hitrih *deuteronov* in *tritonov* in pojave razložil s preprostim modelom. Ta model se je kasneje uveljavil v fiziki reakcij med težkimi ioni z visokimi energijami in je danes znan kot *koalescentni model*. Kot konzultant je sodeloval tudi pri *Bell Telephone Laboratories* v ZDA. Leta od 1966 do 1968 je preživel kot znanstveni sodelavec v CERN-u, kjer se je pridružil skupini Georgesa Charpaka. Sodeloval je pri začetnih poskusih z večičnimi proporcionalnimi komorami; za njihov razvoj je G. Charpak leta 1992 dobil Nobelovo nagrado. Kasneje je organiziral sodelovanje Charpakove skupine s fiziki z univerz Lausanne in Zürich, v okviru katerega so potekale pomembne meritve s področja elektromagnetnih interakcij, povezane z delom Nobelovega nagrajenca iz leta 1957 Tsung-Dao Leeja. Leta 1968 je Črtomir Zupančič postal redni profesor na *Ludwig-Maximilians-Universität* v Münchenu (LMU), kjer je nadaljeval raziskave v fiziki jeder in osnovnih delcev. Leta 1976 se je pridružil skupini pod vodstvom kasnejšega Nobelovega nagrajenca Carla Rubbie, ki je pripravljala eksperiment NA4 (kasneje BCDMS) na pospeševalniku SPS (*Super Proton Synchrotron*). Leta 1978 je prevzel vodstvo te skupine, ki je v letih 1979–82 izvedla pomembne poskuse, katerih rezultati so bili v skladu z elektrošibko teorijo Nobelovih nagrajencev (1979) S. Glashowa, A. Salama in S. Weinberga.



Črtomir Zupančič je bil dve leti predstojnik na *Fakulteti za fiziko* na LMU, dve leti dekan te Fakultete in tri leta član akademskega senata na LMU. Več let je bil član odborov ocenjevalcev za projekte iz fizike visokih

in srednjih energij pri nemškem zveznem ministrstvu za raziskave in tehnologijo. Šest let je bil predsednik *Odbora za srednje energije*. V CERN-u je bil nekaj let član znanstvenega sveta, ki je posvetovalni organ generalnega direktorja. Leta 2005 je bil izvoljen za izrednega člana *Slovenske akademije znanosti in umetnosti*.

Profesor Zupančič, nam za začetek na kratko poveste, iz kakšne družine prihajate?

Moj oče je bil novinar, pred vojno je bil dolga leta urednik *Slovenskega naroda*¹, po vojni je bil še nekaj časa v službi pri *Ljudski pravici*², ni pa imel več vodilnih funkcij. Po upokojitvi se je ukvarjal s prevajanjem in na primer prevedel tudi *Dobrega vojaka Švejka*³. Njegov prevod je bil pozneje še večkrat ponatisnjen. Zelo se je zanimal za jezik in lepota ter čistost slovenskega jezika sta mu veliko pomenila. Oče je bil po rodu kmečki sin. V tistih časih si niso mogli privoščiti šolanja vseh otrok in moj oče je imel srečo, njega so namreč poslali v šole le zato, ker njegov starejši brat v šoli ni bil uspešen in so zato pozneje v šolo poslali še najmlajšega sina. Maturiral je med prvo svetovno vojno in bil takoj zatem mobiliziran. Kot nižjega oficirja so ga poslali na rusko fronto, kjer je zbežal k Rusom. Nekaj časa je bil ruski vojni ujetnik. Takrat se je oficirjem tudi v ujetništvu v glavnem dobro godilo. Potem se je priključil srbskemu ekspedicijskemu korpusu, ki se je pri Dobrudži⁴ boril proti Avstro-Ogrski in je imel hude izgube. Skupaj z drugimi Slovenci pa je prišel v spor z višjimi srbskimi oficirji, ki so korpus šteli za srbski in ne za jugoslovanski. Zato se je potem kmalu priključil ruski carski vojski. Ruska carska vlada pa je podpirala Srbe in bi se Slovencem v ruski vojski slabo godilo, če ne bi na srečo prišlo do ruske marčne revolucije. V zmedu po marčni revoluciji je oče nekako prišel v Sibirijo, kjer je bil nekaj časa celo visok vojaški poveljnik za velik del Sibirije. Ko je v Rusiji izbruhnila *oktobrška revolucija*, je tudi v Sibiriji

¹ Časopis Slovenski narod so ustanovili slovenski rodoljubi kot protiutež Bleiweisovim Novicam. Časopis je začel izhajati leta 1868 v Mariboru. Prvi urednik je bil Anton Tomšič, drugi pa Josip Jurčič. Časopis je promoviral ideje zedinjene Slovenije. Časopis je redno izhajal do leta 1943. V času 1943–1945 je *Slovenski narod* izhajal le še enkrat tedensko v okviru časopisa *Jutro* kot *Ponedeljska izdaja Jutra*.

² Glasilo Komunistične partije Slovenije *Ljudska pravica* je izhajalo občasno že od leta 1934. Po drugi svetovni vojni je časopis *Ljudska pravica* postal dnevnik. Leta 1959 se *Ljudska pravica* združi s časopisom *Slovenski poročevalec* in izhaja kot dnevnik *Delo* do današnjih dni.

³ *Dobri vojak Švejk* je zbirka satiričnih prigod vojaka Švejka v prvi svetovni vojni. Dobrega vojaka Švejka je napisal češki humorist in satirik Jaroslav Hašek (1883–1923). Dobri vojak Švejk je bil preveden v več kot 60 svetovnih jezikov.

⁴ Dobrudža, področje v današnji Romuniji in Bolgariji, ki je nekoliko večje od Slovenije. Z zahoda in severa Dobrudžo omejuje Donava, z vzhoda Črno morje, na jugu pa Dobrudža zavzema še severnovzhodni del Bolgarije.

prišlo do obračunavanja. Moj oče je takrat kot vojaški poveljnik zaščitil lokalne komuniste tako, da jih je pomagal skriti in je po zmagi komunistične revolucije v Sibiriji zaradi tega postal pravi heroj. Pozneje so komunisti vse za revolucijo zaslužne ljudi poslali v partijske šole, in tako se je tudi moj oče znašel v tej šoli. Za oficirje, ki so bili vajeni mnogih privilegijev, je bilo v partijski šoli življenje težko in prihajalo je do sporov. Zaradi nesrečnih naključij in nespoštovanja komunistične discipline se je moj oče znašel v zaporu. V tamkajšnjih zaporih pa so vladali madžarski komunisti, ki so sloveli kot kruti sovražniki „avstrijskih Slovanov“. Kot zapornik je bil poslan z vlakom iz Omska v Tomsk⁵. V strahu pred pretepanjem, ki bi se končalo s kopanjem lastnega groba in ustrelitvijo, je očetu ponoči na vlaku nekako uspelo da si je prerezal žile in ga je straža zjutraj našla v mlaki krvi. To je bilo proti pravilom celo za na smrt obsojenega in so ga odpeljali v bolnico. Zaradi mraza in stradanja v bolnici je zdravljenje trajalo več mesecev. Ko je končno prišel v zapor v Tomsk, so se tamkajšnje razmere umirile. Očetove prestopke so preiskali in ga po nekaj mesecih izpustili, moral pa si je poiskati delo in ostati v Tomsku. Končno pa je le dobil dovoljenje, da kot tujec zapusti Sovjetsko zvezo. Na več tednov trajajoči poti s sibirsko železnico proti zahodu se je nalezal pegavice. V petrograjski bolnici jo je prebolel in tako postal imun proti pegavici, kar mu je dvajset let kasneje morda rešilo življenje kot jetniku v nemškem koncentracijskem taborišču Dachau. Iz Petrograda se je vrnil v Moskvo, kjer je na italijanskem poslaništvu dobil italijanski potni list pod pretvezo, da je doma iz okolice Trsta. Ker je bil zaradi bivanja v Rusiji na seznamu nevarnih komunistov, je ob vrnitvi v takratno Jugoslavijo imel še dodatno srečo, da je bil poveljnik mejne policije njegov prijatelj. V Ljubljano se je vrnil šele leta 1922.

Mama pa je bila iz ugledne ljubljanske družine Pircev. Z mojim očetom, Jožetom Zupančičem, sta se poznala že v gimnazijskih letih, saj sta bila sošolca. Mamin oče je bil znan advokat in družina je bila pred vojno premožna. Vsako poletje se je družina petih otrok skupaj z mojo staro materjo in guvernanto preselila v Portorož. Med vojno so pa izgubili večino premoženja. Mama je med vojno študirala v Pragi francoščino. Po vojni je v Ljubljani začela študirati še pravo, a študij je končala nosečnost. Oče in mama sta bila iz zelo različnih družin.

Potem je prišla druga svetovna vojna. Vi ste bili takrat že gimnazijec.

V drugi svetovni vojni je bil oče aktivist Osvobodilne fronte (OF). Po Ljubljani je zbiral denar za OF. Po kapitulaciji Italije so ga zaprli in odpeljali v Dachau, kjer je ostal do osvoboditve in prihoda zaveznikov. Jaz sem bil med vojno gimnazijec na *Klasični gimnaziji v Ljubljani*⁶, pa so me sošolci,

⁵Omsk in Tomsk sta mesti v jugozahodni Sibiriji.

⁶*Klasična gimnazija v Ljubljani* je bila šola, katere začetke delovanja bi lahko postavili v leto 1563, ko se je začelo protestantsko latinsko šolanje. (Glej *Daljša opomba*.)

ki so bili domobransko usmerjeni, skupaj s sošolcem Marjanom Ahčinom vrgli iz razreda.

Bila je vojna, ampak vseeno, ... kako „vrgli“ iz razreda?

Ob kapitulaciji Italije jeseni leta 1943 sem bil star že skoraj 15 let in hodil sem v 5. razred osemrazredne *Klasične gimnazije v Ljubljani*. Ker je bil moj oče zaradi sodelovanja z OF interniran v Dachau, Marjanov oče, zdravnik dr. Marjan Ahčin⁷, pa je bil v partizanih, je bilo na dlani, da tudi midva z Marjanom simpatizirava z OF. Kot so tedaj rekli, sva bila sovražnika ljudstva. Nekje v začetku leta 1944 so naju domobransko usmerjeni sošolci pozvali, da sama zapustiva razred. Ko se na poziv nisva odzvala, so pripeljali okrepitev iz višjih razredov. Skupaj so naju odvedli iz razreda. Iz solidarnosti z nama je potem razred prostovoljno zapustil še sošolec Jože Pogačnik. Taka čistka se je istočasno dogodila še v nekaterih drugih višjih razredih. Seveda je bilo to v nasprotju z gimnazijskimi pravili in šel sem se pritožiti v direktorat. Direktor je bil Marko Bajuk⁸, ded slovenskega politika dr. Andreja Bajuka. Do direktorja tedaj nisem prišel, njegova tajnica pa mi je sporočila, da me bo poklical, ko bo zadevo preučil. Čez nekaj tednov me je direktor res poklical na zaslišanje. Zapisnik je moral pisati naš razrednik in profesor latinščine Rudolf Južnič, za katerega sem vedel, da se s takimi postopki ni strinjal, a pomagati mi ni mogel. Po nekaj uvodnih vprašanjih in odgovorih se je zasliševanje končalo nekako takole.

Direktor: „Ali odobravate partizanske zločine?“

Jaz: „Zločinov nikoli ne odobravam, tudi pri partizanih ne.“

Direktor: „Kaj pa potem odobravate pri partizanih?“

Jaz: „To, da se borijo proti Nemcem.“

Če bi zapisnik prišel v roke okupatorjem, bi me zaradi predrznosti mojih odgovorov gotovo poslali vsaj v delovno taborišče. Seveda nisem pričakoval, da bi me Bajuk oprostil. Vendar sem nekaj tednov po zaslišanju dobil sporočilo, da sem spet sprejet na *Klasično gimnazijo*. Sreča je hotela, da je bil moj stric dr. Savo Pirc, Bajukov zobozdravnik, in tako je stričevo posredovanje pripomoglo k moji vrnitvi v šolo. V razred se je lahko vrnil tudi Marjan Ahčin. Zanimivo pa je, da Jožeta Pogačnika, ki je sam solidarnostno izstopil, niso hoteli sprejeti ali pa se sam ni hotel vrniti. Razgretim

⁷Dr. Marjan Ahčin (1903–1988) je bil zdravnik in partizan od leta 1941, pozneje v času 1945–1950 član vlade Ljudske republike Slovenije (LRS) in v letih 1945–1946 minister za narodno zdravje LRS, od 1946–1950 pa prav tako minister preimenovanega Ministrstva za ljudsko zdravstvo LRS.

⁸Marko Bajuk (1885–1961) je bil pred vojno ravnatelj *Klasične gimnazije v Ljubljani*, pozneje tudi vodja begunske gimnazije v Avstriji. Bajukova družina emigrira v Argentino. Sin Marka Bajuka, Božidar Bajuk ima sina Andreja Bajuka, ki je po vrnitvi iz Argentine leta 2000 postal predsednik slovenske vlade, v času 2004–2008 pa je bil finančni minister.

domobranskim sošolcem najina vrnitev ni bila vseč in najvnetejša med njimi sta kmalu izginila iz razreda. Menda sta kot domobranca padla v bojih.

Spomini na čas študija v letih 1947–1952?

Moj profesor matematike in fizike na gimnaziji je bil dober matematik, kasneje je tudi postal učitelj matematike na eni izmed fakultet Univerze v Ljubljani, mislim pa, da za fiziko ni imel najboljšega smisla. Predaval je po Adlešičevih⁹ knjigah in obtičal sem že na prvih straneh. Nisem mogel razumeti pojmov, kot so hitrost in pospešek, ker sem želel razumeti njihovo matematično ozadje. Ves mesec sem se mučil in seveda nisem mogel sam najti Leibnizevega in Newtonovega infinitezimalnega računa. Kolikor se spominjam tedanje Adlešičeve knjige, na primer formula

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

ni bila nikjer razložena, niti nisem vedel, kako naj smiselno izberemo velikost količine Δt (namreč odvisno od merske natančnosti). Celo eksperimentalni fizik s tako „nedefinicijo“ nima kaj početi, še manj pa ubogi srednješolec. Begali so me izjemno težki koncepti limite in infinitezimalnega računa, ki jih pri matematiki tedaj nismo obravnavali. Po svoje je Adlešičeva knjiga dosegla enega od svojih namenov. Jeza, da je ne razumem, je bistveno prispevala k moji odločitvi za študij fizike.

Klasično gimnazijo je obiskoval tudi prof. Vidav¹⁰, pa prof. Gosar¹¹ in prof. Povh¹². Izobrazba, ki jo je dajala *klasična gimnazija*, je pozneje v študiju (tudi naravoslovja) koristila mnogim. Jaz sem vedno trdil, da je za višjo matematiko latinščina celo boljša priprava kot matematika. Na klasični gimnaziji smo imeli latinščino osem let. Na koncu smo prebirali zahtevne tekste Tacita¹³. Spomnim se maturitetnega teksta – ves odstavek en sam dolg stavek iz Tacita. Slovnično zapleten tekst, ki ga nisi mogel razumeti, če nisi res popolnoma obvladal strukture jezika. Problem je bil še najbolj podoben dekodiranju, saj je šlo za kompleksno povezovanje medsebojnih pomenov in strukture besed. In prav to je tisto, česar se mora človek naučiti pri študiju matematike ali fizike oziroma pri kvalitetnem znanstvenem delu kakršnekoli vrste. Gimnazijska matematika pa je preprostejša in zahteva predvsem, da se nekaj naučiš bolj ali manj na pamet.

⁹Miroslav Adlešič (1907–2002), avtor učbenikov za fiziko.

¹⁰Ivan Vidav, rojen 1918, profesor matematike na Univerzi v Ljubljani, član SAZU od 1958. Glej intervju v *Obzornik mat. fiz.* **54** (2007), št. 6.

¹¹Peter Gosar, rojen 1923, profesor fizike na Univerzi v Ljubljani, član SAZU od 1969.

¹²Bogdan Povh, rojen 1932, profesor fizike na Univerzi v Heidelbergu in direktor na Max-Planck inštitutu, član SAZU od 1975.

¹³Gaius Cornelius Tacitus (okoli 56–117), politik in zgodovinar rimskega cesarstva, najbolj znan po delih *Annales* in *Historiae*, ki opisujeta rimsko cesarstvo v času približno od 40 pr. Kr. do 90 po Kr.

Med študijem smo morali redno opravljati t. i. delne izpite iz najvažnejših obveznih predmetov. Med njimi so bili izpiti iz fizike pri profesorju Peterlinu¹⁴ najzahtevnejši. Prvi izpit sem pri njem dobro opravil in tudi spoznal njegov način spraševanja. V približno eni uri je dodobra izprašal kandidata. Hitro je skakal z enega področja na drugo, hitro nadaljeval tam, kjer je bilo znanje solidno, in se poglobil na mestih, kjer se je znanje študenta zdelo negotovo. Pri drugem izpitu sem, priznam, uporabil zvijačo. Dobro sem bil pripravljen za izpit, ki je obsegal poglavja fizike atomov in molekul ter magnetizem. Še posebej natančno in poglobljeno pa sem bil pripravljen na vprašanja iz magnetizma. Zato sem ob vprašanju iz magnetizma najprej okleval, jecljal in se lovil in tako profesorja Peterlina pripravil do tega, da je prav tu začel vrtati v moje znanje in sem se na svoje veliko zadovoljstvo lahko izkazal. Nikoli ne bom vedel, ali je sprevidel, da sem ga ujel v past, a zagotovo mi tega ni zameril. Mislim, da sem bil prav takrat dokončno sprejet v skupino mladih fizikov, ki nas je profesor Peterlin ocenil kot perspektivne. Postal sem njegov pomožni asistent. Leta 1952 sem imel opravljene vse delne izpite in sem se želel resno poglobiti v študij za diplomski izpit, ki bi ga opravil šele naslednje leto. Sicer so mi starši zagotavljali vse potrebno za nemoten študij, takrat pa mi je oče rekel: „Sinko, še eno dodatno leto te ne bom več redil.“ Do smrti mu bom hvaležen za to nepopustljivost. Prisilil me je namreč, da sem hitro diplomiral in se lahko posvetil študiju fizike na veliko bolj produktiven način, kot je pasivni študij.

Kmalu po diplomi ste odšli v Kopenhagen?

Jugoslavija je imela takrat tri nuklearne inštitute, B. Kidrič v Vinči, v bližini Beograda, R. Bošković v Zagrebu in J. Stefan (IJS) v Ljubljani. Niels Bohr¹⁵ je bil takrat predstojnik svetovno znanega inštituta v Kopenhagenu in Danska je tudi Jugoslaviji ponudila štiri štipendije za izpopolnjevanje mladih fizikov v Kopenhagenu. Eno štipendijo je dobila Ljubljana in Peterlin je izbral mene. Tako sem prišel v Kopenhagen decembra 1952 in ostal tam do poletja 1954. Po vrnitvi na IJS me je že naslednje leto, to je leta 1955, čakalo služenje vojaškega roka.

Takratno jugoslovansko politično in vojaško vodstvo je imelo veliko željo po atomski bombi. Se je to poznalo pri pomenu in denarju, ki so ga za razvoj dobili predvsem omenjeni inštituti Boris Kidrič, Ruđer Bošković in Jožef Stefan?

Da, IJS se je v nekaj letih od mojega odhoda v Kopenhagen do vrnitve iz vojske močno okreplil. Verjetno so bili vzroki prav v željah jugoslovanskega političnega in vojaškega vodstva po lastni atomski bombi. Leta 1955 je

¹⁴Anton Peterlin (1908–1993) slovenski fizik svetovnega slovesa. Član SAZU od 1946.

¹⁵Niels Henrik D. Bohr (1885–1962), danski fizik, eden najbolj poznanih fizikov iz začetkov dvajsetega stoletja. Nobelova nagrada leta 1922.

Aleksandar Ranković, takratni zvezni minister za notranje zadeve in eden najožjih sodelavcev predsednika Tita, prevzel vodstvo *Zvezne komisije za nuklearno energijo* (ZKNE). Vodje treh nuklearnih institutov, profesor Peterlin v Ljubljani, profesor Supek¹⁶ v Zagrebu in profesor Savić¹⁷ v Beogradu, so položaj dobro izkoristili in dobili prepotrebna sredstva za razvoj institutov ter naravoslovnih znanosti nasploh. Seveda so se fiziki naivnosti generalov, ki so tudi radi obiskovali omenjene inštitute, za hrbotom lahko le smejali. Stvari so nekaj časa lepo tekle, pozneje, ko ni bilo hitrih rezultatov, pa so se razmere začele zaostroovati tako v odnosu do oblasti, kot tudi zaradi različnih interesov znotraj institutov samih. Leta 1957 je Boris Kraigher, tedanji predsednik Izvršnega sveta Ljudske republike Slovenije, torej takratni predsednik slovenske vlade, od Peterlina prevzel predsedovanje Upravnega odbora IJS. Politiki so bili nad (ne)delom fizikov, kot so si ga naivno predstavljali, čedalje bolj razočarani. V spominih na IJS¹⁸ sem prebral, da sem bil ob koncu leta 1957 imenovan v petčlansko komisijo pod vodstvom M. Osredkarja¹⁹, ki naj bi izdelala *Predlog za perspektivno usmeritev in reorganizacijo IJS*. Spomnim se le precej brezobličnega „raporta“ pri Borisu Kraigherju spomladi leta 1958, katerega namen mi ni bil jasen. Po reaktorski nesreči v Vinči 15. 10. 1958, ki je zahtevala eno smrtno žrtev in več ranjenih, so politiki dokončno ugotovili, da znanstveniki niso sposobni pravilno voditi institutov. Vsi vodje institutov razen prof. Supka v Zagrebu, ki je prevzel tudi predsedovanje *Strokovnega sveta ZKNE*, so bili odstavljeni. Peterlina je zamenjal Moljk²⁰, ki je po odstopu Supka postal tudi predsednik *Strokovnega sveta ZKNE*. Novi direktor IJS je postal Šinkovec. Eden njegovih najresnejših ukrepov je bila uvedba enotnega delovnega časa od sedmih zjutraj do poltreh popoldan. Razen varnostnikom je bilo zadrževanje v prostorih inštituta izven delovnega časa prepovedano. Za raziskave na betatronu²¹ je bila to največja neumnost. Betatron je potreboval vsaj osem ur od zagona do ustalitve, ki je omogočala meritve. Tako se je delo na betatronu praktično ustavilo. Moja pobuda za nedolžno javno demonstracijo proti uvedbi enotnega delovnega časa je zadostovala, da je moje delo na IJS postalo nemogoče in sem se preselil na univerzo. Pozneje pa sem zaradi tega imel tudi še dodatne težave z izdajo potnega lista, pa sem kljub temu jeseni leta 1960 lahko odpotoval v ZDA na *Brookhaven National Laboratory*, kjer

¹⁶Ivan Supek (1915–2007), profesor jedrske fizike na zagrebški univerzi, filozof in pisatelj. (Glej *Daljšje opombe*.)

¹⁷Pavle Savić (1909–1994), srbski kemik in fizik. (Glej *Daljšje opombe*.)

¹⁸M. Osredkar in N. Polenec (ur.): Pripovedi o IJS, Ob 50-letnici IJS, str. 35–36, Ljubljana, IJS 2000.

¹⁹Milan Osredkar (1919–2003), profesor fizike na Univerzi v Ljubljani in direktor IJS v času 1963–1974.

²⁰Anton Moljk (1916–1998), profesor fizike na Univerzi v Ljubljani.

²¹Betatron, pospeševalnik elektronov. (Glej *Daljšje opombe*.)

sem ponovno ujel korak z okoljem, v katerem so bili raziskovalni dosežki odločilno merilo uspeha.

Doktorirali ste v Ljubljani pri profesorju Peterlinu?

Formalno sem doktoriral v Ljubljani pri prof. Peterlinu. Profesor Peterlin je bil takrat veliko ime slovenske fizike. Kaj več o prof. Peterlinu in o zanimivih dogajanjih tistega časa lahko preberete v *Zborniku Antona Peterlina*²². Doktorat sem napisal, ko sem bil star sedemindvajset let, tik preden sem moral k vojakom. Doktorat je bil le povzetek mojega dotedanjega dela, ki je temeljilo na eksperimentalnem delu v Københavnu in na teoretskih študijah, ki sva jih v Ljubljani opravila skupaj z Darkom Jamnikom²³. Leta 1955 sem odšel na služenje vojaškega roka in tik pred tem oddal doktorsko delo. Zagovor sem opravil kot vojak leta 1956. V komisiji so bili poleg prof. Peterlina še prof. Vidav, prof. Kuščer²⁴ in prof. Supek iz Zagreba. Bil pa je to zagovor le formalne narave. Doktorat je bil sprejet in potrjen na podlagi člankov, objavljenih v uglednih mednarodnih fizikalnih revijah. Sicer pa še dobro, da je bilo tako (nasmeh). Vojska mi je namreč tako omračila um, da zagovora gotovo ne bi opravil dobro, če bi bil zelo resen in poglobljen.

Bil je to doktorat iz jedrske in atomske fizike. V jedrski fiziki sem sodeloval pri odkritju in prvih raziskavah tako imenovanega *coulombskega vzbujanja jeder*, ki je bila takrat zelo pomembna metoda za potrditev kolektivnega jedrskega modela Aage Bohra²⁵, Bena Mottelona²⁶ in Jamesa Rainwaterja²⁷, za kar so ti trije fiziki leta 1975 dobili Nobelovo nagrado. Dejanski eksperimentalni odkritelj coulombskega vzbujenega stanja je bil moj danski kolega in eden izmed kasnejših direktorjev Bohrovega inštituta Torben Huus²⁸, ki je že leto prej pri eksperimentih opazil spektralno črto, ki pa je ni znal razložiti. Pozneje je med Mottelsonovim seminarjem o tedanji novi teoriji Ter-Martirosjana²⁹ pomislil, da je omenjena spektralna črta ustrezala prvemu vzbujenemu stanju *tantala*³⁰. Eksperimentalno delo, ki je potrdilo to hipotezo in odkrilo tudi drugo vzbujeno stanje tantala, sva s

²²V. Bukovšek et al. (ur.): *Anton Peterlin 1908–1993, Življenje in delo*. Zbornik ob stoletnici rojstva akademika Antona Peterlina, prvega direktorja Inštituta „Jožef Stefan“, Slovenska akademija znanosti in umetnosti in Inštitut Jožef Stefan, Ljubljana, 2008.

²³Darko Jamnik, rojen 1925, profesor fizike, utemeljitelj eksperimentalne fizike jedra na Inštitutu Jožef Stefan v Ljubljani.

²⁴Ivan Kuščer (1918–2000), profesor fizike na Univerzi v Ljubljani.

²⁵Aage Niels Bohr, (1922–2009), danski fizik, sin veliko bolj znanega Nielsa Bohra, Nobelova nagrada 1975.

²⁶Ben Roy Mottelson rojen 1926, ameriško-danski fizik, Nobelova nagrada 1975.

²⁷Leo James Rainwater (1917–1986), ameriški fizik, Nobelova nagrada 1975.

²⁸Torben Huus (1919–2006), danski fizik.

²⁹Karen Avetovič Ter-Martirosjan (1922–2005), gruzijski fizik, veliko ime ruske fizike in Inštituta za teoretično in eksperimentalno fiziko v Moskvi.

³⁰Tantal, lat. tantalum – Ta.

Torbenom Huusom objavila v ugledni znanstveni reviji *Danske akademije znanosti*³¹.

Pozneje sva se pa z Jamnikom v Ljubljani lotila teoretskega obravnavanja ionizacije atomske lupine K pri trkih težkih nabitih delcev s tantalom. Problem je bil v tem, da eksperimentalni pridelek spektralne črte K (ki je spremljala jedrske črte v spektru) ni bil v skladu z obstoječo nerelativistično teorijo. Tantal je pa že dovolj težak, da so relativistični prispevki pomembni pri njegovi notranji elektronski lupini. Zato sva se z Jamnikom lotila izračunov z relativističnimi valovnimi funkcijami. To je bilo tako komplicirano, da si nikoli pozneje nisem več želel lotiti se relativističnih valovnih funkcij. Zagotovo z računi tudi nikoli ne bi prišla do konca, če ne bi bila poslušala Plemeljevih predavanj o funkcijah kompleksnih spremenljivk. Plemelj³² nas je dobro naučil kompleksne integracije in s temi orodji je bilo mogoče integrale, ki so nastopali v najini fizikalni teoriji, izračunati. Šele ko sva sama z računanjem na roko prišla do rezultatov, sem našel reference o teoriji tako imenovanih posplošenih hipergeometričnih funkcij dveh spremenljivk, ki so jo matematiki dodelali že deset let pred nama. Funkcije, s katerimi sva računala, so bile zelo nesramne: njihove numerične vrednosti je bilo mogoče izračunati le z uporabo alternirajočih vrst, ki konvergirajo zelo počasi. Da bi z izračuni prišli v okvire natančnosti 1 %, je bilo treba izračunati okrog 20 členov. Takrat ustreznih računalnikov v Ljubljani še ni bilo. Z Jamnikom sva si pomagala tako, da sva najela študenta Trampuža, ki je pozneje delal na IJS, je pa že pred leti umrl. Pomagal nama je tako, da je na švedskem elektromehanskem računalu Facit³³ izračunaval posamezne vrednosti funkcij. Pri tem sva z Jamnikom morala izdelati tudi postopek za odkrivanje in preverjanje računskih napak, ki so bile neizogibne pri takšnem računanju. Bilo je težko, a vendar zanimivo.

Bi lahko kaj več povedali o vašem bivanju v Københavnu? Podrobnosti vašega dela v fiziki na *Bohrovem inštitutu* sicer niti jaz niti mnogi naši bralci ne bi razumeli, gotovo pa lahko poveste še kaj zanimivega o tako

³¹T. Huus in Č. Zupančič: *Excitation Of Nuclear Rotational States By The Electric Field Of Impinging Particles*, Matematisk-Fysiske Meddelelser, Kongelige Danske Videnskabernes Selskab 28 (1), 1953 (glasilo *Danske kraljeve akademije znanosti*. Drugače od SAZU danska „*Videnskabernes Selskab*“ nima umetnikov kot članov. Ti imajo lastno „Akademijo“, ki pa je obenem šola za umetnost.).

³²Josip Plemelj (1873–1967), slovenski matematik svetovnega slovesa. Prvi rektor ljubljanske univerze. Član SAZU od ustanovitve leta 1938. Bil je tudi član hrvaške, srbske, jugoslovanske in bavarske akademije znanosti.

³³*Facit (Facit AB)*, Švedska korporacija, ki se je v letih 1922 do 1970 razvila v močno mednarodno tehnološko firmo, ki je proizvajala elektromehanske računske stroje. Na višku svoje moči je zaposlovala približno 15 000 ljudi v več kot 100 državah. Leta 1971 je s pojavom japonskih elektronskih računal družba *Facit* zelo hitro propadla. Preostanek firme sta pozneje prevzela *Elektrolux* in *Ericsson*.

velikem človeku, kot je bil Niels Bohr, ki ste ga v Kopenhagenju večkrat srečali.

To je dolga zgodba. V Kopenhagenju na *Bohrov inštitut*³⁴ sem prišel, kot rečeno, z dansko štipendijo. Delal sem eksperimentalno na Van de Graaffovem³⁵ pospeševalniku. O zgodovini razvoja atomske fizike, ki je tako tesno povezana z življenjem Nielsa Bohra, lahko veliko preberete na primer v knjigi Abrahama Paisa *Niels Bohr's Times*³⁶. Zanimivo je omeniti, kako zelo so na Danskem spoštovali Nielsa Bohra in njegove znanstvene dosežke. To najboljše opiše danski državni protokol, ki so ga uporabljali pri proslavah ali slavnostnih sprejemih. Na takih slavnostih je najprej nastopila kraljeva družina, zatem sta prišla na vrsto predsednik vrhovnega sodišča in predsednik vlade, sledil je Niels Bohr z ženo, potem pa šele ministri in drugi visoki državni uslužbenci. Bohr s svojo družino je v Kopenhagenju imel tudi častno dosmrtno stanovanje v gradu Carlsberg³⁷, s čimer mu je država izkazala še prav posebno priznanje. Dobro se spomnim tudi Bohrovega obiska v Jugoslaviji. Kmalu po moji vrnitvi iz vojske, torej nekaj let po mojem bivanju v Kopenhagenju, je Bohr najprej obiskal Beograd in Zagreb. V Zagreb sem šel ponj skupaj s šoferjem in s Peterlinovim službenim avtomobilom.

Leta 1922 je Niels Bohr prejel Nobelovo nagrado. Istega leta je kot nobelovec predaval v Göttingenu, kjer ga je poslušal tudi mladi Werner Heisenberg³⁸ in menda celo oporekal Bohrovi matematiki med predavanjem. Bohr je takoj opazil Heisenbergovo bistrost in tedaj se je začelo njuno dolgotrajno in kontroverzno poznanstvo. Ali o teh zanimivih zgodbah³⁹ veste kaj več?

Veliko o tem ne vem. Nekaj mi je povedal Torben Huus, od Bohra, njegovega sina ali od koga iz njegove družine pa nisem o tem nikoli nič slišal. Enkrat sem bil skupaj s Heisenbergom povabljen na večerjo k danskemu teoretskemu fiziku Christianu Møllerju⁴⁰, a o srečanju med Bohrom in Hei-

³⁴ *Inštitut Nielsa Bohra za teoretično fiziko* je del *Inštituta Nielsa Bohra za astronomijo, fiziko in geofiziko* na Univerzi v Kopenhagenju. (Glej *Daljšje opombe.*)

³⁵ Robert Jemison Van de Graaff (1901–1967), ameriški fizik in izumitelj visokonapetostnega elektrostaticnega generatorja, ki se uporablja kot pospeševalnik nabitih delcev. Instrument je našel številne uporabe ne samo v atomskih raziskavah ampak tudi v industriji in medicini. Prvi instrumenti so dosegali energije protonov do 1,5 MeV.

³⁶ A. Pais: *Niels Bohr's Times: In Physics, Philosophy, and Polity*, Oxford, Clarendon Press, 1991.

³⁷ Dvorec je postavil ustanovitelj pivovarske družbe Carlsberg Jacob Christian Jacobsen (1811–1887). (Glej *Daljšje opombe.*)

³⁸ Werner Karl Heisenberg (1901–1976), nemški fizik in Nobelov nagrajenec za fiziko leta 1932. Heisenberg je bil vodja nacističnega jedrskega programa. (Glej *Daljšje opombe.*)

³⁹ Bohr in Heisenberg sta bila pred vojno tudi osebna prijatelja, druga svetovna vojna pa ju je ločila. (Glej *Daljšje opombe.*)

⁴⁰ Christian Møller (1904–1980), za Nielsom Bohrom najpomembnejši danski teoretski fizik v prvi polovici preteklega stoletja.

senbergom leta 1941 ni bilo govora. Po besedah Torbena Huusa Heisenberg po vojni ni bil nikoli več povabljen k Bohrovim na dom. Po informacijah, ki so prišle od Nielsa Bohra, naj bi se Heisenberg na srečanju z Bohrom leta 1941 obnašal precej naduto kot predstavnik okupatorjev in praktično prevzel vodenje inštituta. Po vojni sem v Ženevi spoznal Heisenbergovo hčerko (ki je poročena s fizikom). Od nje sem slišal drugo interpretacijo tega dogodka. Heisenberg naj bi poskušal Bohrov inštitut čim bolj zavarovati pred nacističnimi vplivi in je zato prevzel vodenje inštituta. Verjetno sta obe verziji resnični in se je enemu zdelo tako, drugemu pa drugače.

Veste mogoče kaj o dejanskem stanju nemških atomskih raziskav med drugo svetovno vojno? Kako blizu atomske bombe so bili Nemci? Na tistem slavnem srečanju med Bohrom in Heisenbergom leta 1941 v Kopenhavnu naj bi po nekaterih interpretacijah Heisenberg Bohru sporočil, da je Nemčija že zelo daleč v atomskih raziskavah, in se obenem zavzemal za zavezništvo znanstvenikov, ki naj ne bi proizvedli atomskega orožja, po drugi strani pa naj bi od Bohra skušal izvedeti, v kakšnem stanju je bil zavezniški jedrski program. Kaj je bilo dejansko res?

Žal ne vem kaj dosti več, kot je napisano. Po Bohrovi interpretaciji je Heisenberg od njega poskušal pridobiti informacije o tem, kaj ve o ameriških in angleških atomskih raziskavah na področju atomske bombe. Podrobnosti bo najbrž nemogoče ugotoviti. Heisenbergova interpretacija pa pravi, da je skušal z Bohrom doseči sporazum, da ne eni ne drugi ne bi razvijali atomske bombe. Ne vem, ne zveni zelo prepričljivo, saj Bohr takrat ni imel velikega vpliva na to, kar se je dogajalo v Ameriki ali Angliji. Šele pozneje, ko je zbežal, se je vključil v znanstvene dejavnosti v teh dveh državah in je dejansko prispeval k *projektu Manhattan*⁴¹. Takrat je bil najvplivnejši znanstvenik Einstein⁴², ki je s svojim znanim pismom Roosveltu dejansko sprožil začetek *projekta Manhattan*. Niels Bohr, Lise Meitner⁴³, Otto Frisch⁴⁴ in drugi so v letih tik pred drugo svetovno vojno pojasnili mehanizem cepitve uranovih jeder. Otto Hahn⁴⁵ in Fritz Strassmann⁴⁶ sta odkrila cepitev urana. Prav Bohr je bil zaslužen za razlago cepitve, ki je temeljila na bombardiranju

⁴¹ *Projekt Manhattan* je bil tajni zavezniški projekt raziskav s ciljem izdelati atomsko bombo v času druge svetovne vojne. (Glej *Daljšje opombe*.)

⁴² Albert Einstein (1879–1955), nemško-švicarsko-ameriški fizik judovskega porekla, najbolj znan fizik dvajsetega stoletja. Nobelov nagrajenec leta 1921.

⁴³ Lise Meitner (1878–1968), avstrijsko-švedska fizičarka, poleg nobelovca Otta Hahna najzaslužnejša za odkritje cepitve jedra. Teta Otta Frischa.

⁴⁴ Otto Robert Frisch (1904–1979), avstrijsko-britanski fizik, pomemben sodelavec *projekta Manhattan* in pomemben razvijalec detonatorskega mehanizma prve atomske bombe. Nečak Lise Meitner.

⁴⁵ Otto Hahn (1879–1968), nemški kemik. (Glej *Daljšje opombe*.)

⁴⁶ Friedrich Wilhelm „Fritz“ Strassmann (1902–1980), nemški kemik. (Glej *Daljšje opombe*.)

lahkega in redkega uranovega izotopa urana 235 s počasnimi nevtroni. Na teh ugotovitvah je slonela izdelava ameriške atomske bombe, saj je prva⁴⁷ atomska bomba delovala na osnovi cepitve urana 235. Druga⁴⁸ pa je že temeljila na plutoniju 239.

Bi lahko še kako komentirali velika imena, kot so bili Bohr, Oppenheimer, Heisenberg in drugi pomembni znanstveniki moderne fizike?

Oppenheimerja nisem nikoli srečal. Od drugih velikih imen se spomnim Paulija⁴⁹. Bil je osebno prijeten in v fizikalnem svetu vpliven človek. Enkrat, ko je bil na obisku v Københavnu, so mu predstavili novo teorijo kolektivnega modela jedra, v kateri je imel pomembno vlogo Bohrov sin Aage Bohr; bil sem na seminarju, kjer je ta predstavitev potekala. Pauli je bil takrat arbiter v teoretični fiziki in veljalo je, da je novo teorijo mednarodna skupnost fizikov sprejela za svojo, ko ji je Pauli ustrezno prikimal. Medtem ko je Aage Bohr predaval (navzoč je bil tudi Mottelson), je začel Pauli značilno odkimavati. To je bil znak, da se ni strinjal. To odkimavanje se je imenovalo Paulijev *Zitterbewegung*⁵⁰. *Zitterbewegung* je pri Pauliju pomenil počasno vodoravno nihanje glave z naraščajočo amplitudo, s čimer je vse jasneje kazal, da se s teorijo ne strinja. Kmalu je Niels Bohr seminar praktično prekinil in začel Paulija osebno prepričevati o smiselnosti teorije. Na koncu sta govorila sama in zelo tiho v prvi vrsti in nihče od nas ni več slišal ali razumel, o čem je tekla beseda. Aage Bohr kot glavni predavatelj potem sploh ni več prišel do besede. Ampak Nielsu Bohru je Paulija končno uspelo prepričati o smiselnosti kolektivnega modela, ki je v razumevanje atomskih jeder vnesel povsem nove dimenzije. Sicer je Paulijev *Zitterbewegung* vedno pomenil odkimavanje. Pritrdilno je Pauli kvečjemu enkrat prikimal. Znan je bil tudi po tem, da se je njegovo najboljšo priporočilo glasilo: *Über den Herrn X kann ich nichts Nachteiliges berichten*⁵¹.

Ob koncu druge svetovne vojne so bili Nemci s svojim raketnim programom in znanimi projektili V1 in V2, ki so pustošili predvsem po Londonu, daleč pred drugimi. Menda so Nemci zaradi uspehov z V1 in V2 proti koncu vojne v razvoj raketne tehnike ogromno vlagali in imeli s tem veliko stroškov in

⁴⁷Prva atomska bomba z imenom *Little Boy* je bila odvržena na Hirošimo 6. 8. 1945. (Glej *Daljša opombe*.)

⁴⁸Druga atomska bomba z imenom *Fat Man* je bila odvržena na mesto Nagasaki 9. 8. 1945. (Glej *Daljša opombe*.)

⁴⁹Wolfgang Pauli (1900–1958) avstrijsko-švicarski fizik svetovnega slovesa. Nobelova nagrada leta 1945.

⁵⁰*Zitterbewegung* – iz nemščine, izraz iz relativistične kvantne teorije, ki opisuje teoretično nihanje osnovnih delcev, še posebej elektronov. Obstoj takega nihanja je v teoriji rešitev Diracove enačbe prvi predlagal Erwin Schrödinger leta 1930. Šlo naj bi za interference pozitivnih in negativnih energetskih stanj, ki povzročajo (s svetlobno hitrostjo) spremembe lege elektrona s krožnimi frekvencami okrog 1.6×10^{21} Hz.

⁵¹*O gospodu X ne morem reči nič slabega.*

tudi neuspešnih poskusov. Po drugi vojni so Američani dobili Wernherja von Brauna⁵², glavnega strokovnjaka nemške raketne tehnike, Rusi pa so zasegli dejanske rakete s tehnologijo. Vam je takratni razvoj raketne tehnike poznan?

O zadevi ne vem prav veliko. Američani so res veliko pridobili z znanjem Wernherja von Brauna, ki je pozneje vodil ameriški raketni in vesoljski program. Rusi⁵³ so pa imeli že prej zelo napredno raketno tehniko in niso veliko zaostajali za Nemci. Verjetno so pa res z zasegom nemških raket tudi kaj pridobili. Nemci na srečo atomske bombe niso uspeli dokončati, Hitler je v obupu poskušal vse in raketni program jim je vsaj na videz razmeroma dobro tek. Z raketo V2 so Nemci praktično že dosegli tehnologijo, ki je uporabljena v modernih raketah. Te rakete je poganjalo klasično izgorevanje: sežiganje tekočega kisika in vodika ali drugih goriv. A na kemijo se ne spoznam prav zelo. In kot rečeno, tudi o nemškem raketnem razvoju ne vem dosti. Menda je pred kratkim izšla knjiga⁵⁴ nekdanjega Braunovega sodelavca Michaela Neufelda, ki izčrpno govori o nemškem raketnem razvoju tistega časa.

Iz Ljubljane ste za stalno odšli leta 1965?

Že leta 1960 sem dobil dopust na univerzi za odhod na *Brookhaven National Laboratory* (BNL) v ZDA. Pravzaprav sem takrat znanstveno raziskoval v glavnem še na Institutu Jožef Stefan. Leta 1960 sem imel hude težave s pridobitvijo jugoslovanskega potnega lista, v katere so bili žal vpleteni tudi nekateri politično bolj angažirani kolegi fiziki. Potni list sem dobil šele po intervencijah in zvezah prek svoje tašče. Po dveh letih sem se vrnil v Ljubljano. Leta 1965, ko sem dobil ponudbo za nekajletno delo v CERN-u, sem bil zaposlen na univerzi kot izredni profesor. Takrat je bila moja žena, ki je sama zdravnica, bolna. Zdravniki so ji svetovali čimbolj sproščeno življenje in čim manj stresa v službi. Ponudba iz CERN-a je bila idealna priložnost, da se z ženo umakneva v Švico. Moji dohodki v CERN-u so zadostovali, da ženi ni bilo treba delati. Ti razlogi so bili takrat odločilni, da sem na ljubljanski univerzi odpovedal službo. Prej sem poučeval kvantno mehaniko. Po mojem odhodu je to delo prevzel Lovro Pičman⁵⁵, ki je bil kot čisti teoretik tudi bolj primeren za ta položaj na univerzi. V CERN-u sem leta 1965

⁵² Wernher Magnus Maximilian Freiherr von Braun (1912–1977), nemško-ameriški fizik in raketni inženir. (Glej *Daljšje opombe*.)

⁵³ Sergej Pavlovič Koroljov (1907–1966) je bil vodilni sovjetski raketni inženir in po dosežkih na področju raketne tehnike verjetno povsem enakovreden von Braunu. (Glej *Daljšje opombe*.)

⁵⁴ M. J. Neufeld: *Von Braun, dreamer of space, engineer of war*, Alfred A. Knopf in National Air and Space Museum, Smithsonian Institution, 2007.

⁵⁵ Lovro Pičman, rojen 1929, profesor fizike na Univerzi v Ljubljani.

dobil triletno zaposlitev na povabilo generalnega direktorja Weisskopfa⁵⁶, ki je bil zelo ugleden teoretski fizik. Weisskopf se je prvotno ukvarjal s teorijo polja in kvantno mehaniko, pozneje pa je postal jedrski fizik. Bil je soavtor tretjega pomembnega modela v jedrski fiziki, to je tako imenovanega optičnega modela jedra. Kot generalni direktor CERN-a je verjel v veliko prihodnost mejnega področja med jedrsko fiziko in fiziko osnovnih delcev. Jaz sem takrat imel srečo, saj sem v dveh letih dela v BNL v ZDA med drugim delal prav na tem področju. Eksperimenti na pospeševalniku AGS⁵⁷ so pokazali, da so iz tarče prihajali ne samo protoni in pioni, kot se je pričakovalo, ampak tudi hitri devteroni in celo hitri tritoni. Fizikov osnovnih delcev to ni kaj dosti zanimalo, ker devteroni in tritoni niso osnovni delci. Skupaj z Arthurjem Schwarzschildom⁵⁸ sva eno od takrat obstoječih teorij, ki naj bi veljale za devterone, razširila na tritone in na izotop helija ^3He . Na podlagi najine teorije so pozneje lahko razložili reakcije težkih hitrih ionov v jedru. Ta razlaga se je takrat imenovala *koalescentni model*. S tem sva z Arthurjem Schwarzschildom postala znana v fiziki visokih energij. Prav takrat je na drugem poskusu v BNL delal tudi Melvin Schwartz⁵⁹. Ta je za ugotovitve, ki so sledile poskusom, pozneje prejel Nobelovo nagrado skupaj z Leonom Ledermanom⁶⁰, kasnejšim direktorjem Fermilaba⁶¹, in Jackom Steinbergerjem⁶². V skupini Melvina Schwartza in Stanleya Wojcickega⁶³ sem delal veliko pozneje, in sicer na stanfordski univerzi v letih 1975–1976, ko sem tam prebil študijski semester. Melvin Schwartz se je pozneje vrnil v BNL, kjer je postal direktor celotnega laboratorija. S Stanom Wojcickim sem kasneje sodeloval še dvakrat, prvič v akademskem letu 1981–1982, ko je kot Humboldtov štipendist prebil študijsko leto v CERN-ski kolaboraciji BCDMS⁶⁴, ki sem jo takrat vodil; drugič pa v akademskem letu 1988–1989, ko sem jaz prebil študijsko leto na Berkeleyju v Osrednji načrtovalni skupini, po angleško *Central Design Group* (CDG), za gradnjo trkalnika SSC

⁵⁶Victor Weisskopf (1909–2002), avstrijski fizik. (Glej *Daljše opombe*.)

⁵⁷ Pospeševalnik AGS (*Alternating Gradient Synchrotron*) na BNL je bil s takratnimi 33 GeV dolga leta pospeševalnik protonov z največjim dosegom na svetu. (Glej tudi 3. poglavje v dodatku.)

⁵⁸Arthur Schwarzschild (1930–1987), ameriški fizik, zaposlen v *Brookhaven National Laboratory* od 1958, v letih 1981–1987 predstojnik oddelka za fiziko.

⁵⁹Melvin Schwartz (1932–2006), ameriški fizik, ki je skupaj z Ledermanom in Steinbergerjem leta 1988 prejel Nobelovo nagrado za fiziko za odkritja na področju nevtrinov.

⁶⁰Leon Max Lederman, rojen 1922, ameriški fizik.

⁶¹Fermilab (Fermi National Laboratory) blizu Chicaga v ZDA (glej tudi opombo 72) je še danes laboratorij z največjim za fizikalne raziskave delujočim trkalnikom na svetu Tevatronom. (Glej 4. poglavje v dodatku.)

⁶²Jack Steinberger, rojen 1921, nemško-ameriško-švicarski fizik.

⁶³Stanley George Wojcicki, poljsko-ameriški fizik, rojen 1937. (Glej *Daljše opombe*.)

⁶⁴BCDMS: Bolonja–CERN–Dubna (Rusija)–München–Saclay (Francija)

(*Superconducting Super Collider*)⁶⁵. Vodja CDG je bil ameriški fizik, pospeševalniški strokovnjak in profesor na univerzi Cornell Maury Tigner⁶⁶, njegov namestnik pa Stan Wojcicki.

V BNL v ZDA ste bili v času 1960–1962, to je v letih ostre hladne vojne med ZDA in takratno ZSSR. Je hladna vojna na kak poseben način zaznamovala vaše delo in življenje v ZDA?

Lahko bi rekel, da je hladna vojna zame delovala celo pozitivno. Verjetno so bila prav zaradi hladne vojne nekatera prizadevanja za izmenjavo in izobraževanje toliko večja. Danske štipendije, ki sem jo dobil jaz in tudi mnogi drugi, so po mojem mnenju poskušale premostiti politične napetosti. V tem smislu sem jaz od hladne vojne najbrž imel predvsem koristi. Niels Bohr je svoja mirovna prizadevanja usmeril prav v to, da je s štipendijami vabil mlade znanstvenike z vsega sveta, še posebej iz ZSSR, Kitajske in drugih vzhodnih držav ter tudi iz takrat neuvrščene Jugoslavije. Čudovit opis Bohrovega vsestranskega znanstvenega in družbenega dela je omenjena Paisova biografija, kjer govori o Bohrovih prizadevanjih v fiziki, filozofiji in „polity“. „Polity“ tu pomeni veliko več kot „politiko“. Sicer so bila takratna nasprotja hladne vojne nekaj vsakdanjega, a veliko bolj političnega kot znanstvenega značaja, pri našem delu pa tega ni bilo posebej čutiti.

Kako vas je pot zanesla na LMU v München?

V Münchnu sta bili takrat dve univerzi: takratna TH (*Technische Hochschule*, današnja TUM) in LMU. (Po odhodu iz Ljubljane in pred odhodom v ZDA je bil A. Peterlin eno leto redni profesor na TH.) Na TH je že od leta 1952 deloval znani fizik H. Maier-Leibnitz⁶⁷ kot redni profesor za eksperimentalno fiziko. Na LMU pa je leta 1957 odšel v pokoj slavni fizik W. Gerlach⁶⁸, za katerega ni bilo mogoče najti ustreznega naslednika. Maier-Leibnitz je izkoristil začetek velikih nemških vlaganj v razvoj fizike in prepričal bavarsko vlado, da je ustanovila laboratorij za jedrsko fiziko, v katerem naj bi delalo osem rednih profesorjev, štirje na TUM in štirje na LMU, slednji tako rekoč kot kolektivni nasledniki W. Gerlacha. Kot drugi profesor na TUM je bil leta 1964 imenovan Maier-Leibnitzov učenec in nobelovec Mössbauer⁶⁹, kot prvi na LMU pa leta 1965 Ulrich Meyer-Berkhout⁷⁰. Da sem eno od preostalih treh mest na LMU lahko zasedel jaz, je bilo treba

⁶⁵ *Superconducting Super Collider* – gigantski projekt gradnje trkalnika (SSC), ki se je začel v ZDA v poznih 80-ih letih prejšnjega stoletja. (Glej 5. poglavje v dodatku.)

⁶⁶Maury Tigner, rojen 1937, ameriški fizik.

⁶⁷Heinz Maier-Leibnitz (1911–2000), nemški fizik.

⁶⁸Walter Gerlach (1889–1979), nemški fizik, znan po raziskavah na področju magnetnega polja in po Stern-Gerlachovem poskusu.

⁶⁹Rudolf Ludwig Mössbauer, rojen 1929, nemški fizik, znan po odkritjih na področju gama žarkov. Nobelova nagrada leta 1961.

⁷⁰Ulrich Meyer-Berkhout, rojen 1927, nemški fizik.

veliko sreče. Ulrich Meyer-Berkhout je tudi delal v Københavnu pri Torbenu Huusu, in sicer za mano. Tako je Ulrich prek Torbena Huusa spoznal tudi mene. Pozneje sva se pa še osebno srečala na neki konferenci, kjer sem predaval o meritvah s sevanjem gama, ki smo jih opravili v Ljubljani. Tudi priporočilo Aageja Bohra je najbrž pripomoglo k temu, da so mi ponudili profesuro na LMU.

BNL v ZDA, kjer ste delali v času 1960–1962, je bil takrat verjetno eden večjih, če ne največji fizikalni laboratorij na svetu. Danes je CERN⁷¹ največji tak laboratorij in ponos Evrope. Pri ustanovitvi CERN-a leta 1954 je pomembno vlogo imel tudi Niels Bohr?

Da, Bohr je bil zelo pomemben pri ustanovitvi CERN-a. Pred drugo svetovno vojno je bila Evropa v raziskovalni fiziki veliko močnejša od Amerike. Z vojno se je situacija spremenila. Mnogo najboljših fizikov je odšlo v Ameriko. Veliko vrhunskih evropskih fizikov je bilo Judov, napol Judov ali so bili poročeni z Judinjami. V času nacizma in fašizma je tako Evropa izgubila ogromne intelektualne potenciale. Einstein je bil Jud, Fermi⁷² je imel ženo Judinjo, Weisskopf in Bohr sta bila napol Juda ... Seveda je Amerika tudi že prej imela dobre fizike, kot na primer Feynmana⁷³. Po vojni pa je Amerika postala absolutna vodilna sila v fiziki z veliko boljšimi možnostmi za delo, kot so bile v uničeni Evropi. Zato je v Ameriko odšlo veliko vrhunskih strokovnjakov tudi po vojni. Evropa pa je bila materialno in intelektualno opustošena. Najbrž sem tudi jaz zato dobil v Nemčiji službo, saj je bila Nemčija v fiziki še leta 1968 zelo šibka. Bohr je bil po vojni velika avtoriteta fizike in zato zelo pomemben pri ideji CERN-a, ki se je rodil prav iz želje, da bi evropsko fiziko spet postavili na noge in zaustavili beg možganov v Ameriko. Bohr je bil med soustanovitelji CERN-a. Najprej se je oblikovala teoretska skupina raziskovalne fizike, ki je imela sedež v Københavnu. Iz te skupine so prihajale mnoge ideje za širitev dela na eksperimentalno področje, in tako se je začelo tudi načrtovanje eksperimentalnih aparatov poznejšega CERN-a. Lahko bi rekli, da so začetki CERN-a na Danskem, čeprav so CERN uradno ustanovili pozneje z ustanovnim podpisom dvanajstih evropskih držav. Teoretska skupina fizikov, ki je bila predhodnica CERN-a, se je pred naselitvijo v Ženevi iz Københavna preselila v nemški Göttingen⁷⁴. Po dograditvi laboratorija v Ženevi se je delo preselilo v poslopja CERN-a. Takrat je bil pač Bohr vodilni evropski teoretski fizik, ali vsaj najbolj vpliven, in je imel zato pri ustanavljanju CERN-a zelo

⁷¹CERN – iz francoščine: *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*. (Glej *Daljšo opombe*.)

⁷²Enrico Fermi (1901–1954), italijanski fizik. (Glej *Daljšo opombe*.)

⁷³Richard Phillips Feynman (1918–1988), ameriški fizik. (Glej *Daljšo opombe*.)

⁷⁴V Göttingenu je po drugi svetovni vojni deloval nemški fizik Heisenberg. (Glej *Daljšo opombe*.)

pomembno vlogo.

Nedavno je začel delovati novi trkalnik LHC⁷⁵ v CERN-u. To je kolosalni projekt, katerega vrednost znaša blizu 7 milijard evrov. Inštrument, ki se razteza krožno v obsegu približno tridesetih kilometrov, leži 100 metrov pod zemljo, posamezni elektromagneti menda tehtajo več deset ton⁷⁶,... Kako naj si človek predstavlja inštrument takih razsežnosti in to, kar bo, kakor znanstveniki upajo, doprinesel k razumevanju našega obstoja?

(Nasmeh.) Trkalnika še nisem videl. Verjamem pa, da bo stvar delovala, kot je načrtovana. Gre za izjemno dobro premišljen projekt in koncentracija vrhunskega mednarodnega znanja na njem je taka, da ni dvomiti o uspehu. Bo pa treba še nekaj časa, da bodo stekli najzanimivejši poskusi. Zanimivih vprašanj, na katera naj bi LHC pomagal odgovoriti, je veliko. Seveda pa nimamo zagotovil, da bo vse po predvidevanjih. Pričakujemo in upamo, da bomo dobili odgovore, a pot zagotovo ne bo kratka in lahka. Če bodo poskusi potrdili obstoj Higgsovega⁷⁷ delca, to je delca, ki ga predvideva standardni model fizike osnovnih delcev, bo lažje, saj teorije predvidevajo, kako bi ga lahko s pomočjo LHC-ja odkrili. Presenetljivo bo, če Higgsovega delca ne bodo potrdili, ampak odkritje v vsakem primeru ne bo lahko. Narava vprašanja je taka, da lahko pričakujemo najdubo oziroma potrditev obstoja Higgsovega delca šele po nekaj letih poskusov. Obstajajo ocene njegove mase in zanimivo bo, kako bodo poskusi potrdili teorije. Če pa delca ne bo, bo to velik nadaljnji izziv za teoretike, kako razložiti, da ni tistega, kar bi po veljavni teoriji moralo biti. Po drugi strani bodo poskusi vsekakor zanimivi, saj so teoretiki precej pred eksperimentatorji in imajo izdelane modele, ki predvidevajo skorajda vse možne izide. Problem je v tem, da so eksperimenti, ki bi lahko preverjali izdelane teorije današnje teoretične fizike, tako zapleteni in dragi, da jih je vse težje izvesti. Modeli napovedujejo obstoj čedalje težjih osnovnih delcev, verjetnosti, da take delce lahko ustvarjamo v trkih med znanimi stabilnimi delci (kot so protoni ali elektroni), so čedalje manjše in trkalniki čedalje večji in dražji. Standardni model fizike osnovnih delcev ostaja nepopoln, saj ne vsebuje kvantne gravitacije. Nekateri sicer verjamejo v odkritje *dokončne teorije*⁷⁸, ki bi znala razložiti ali vsaj posta-

⁷⁵LHC – *Large Hadron Collider*, veliki trkalnik v centru CERN na švicarsko-francoski meji bo zmožgal pospešiti subatomske delce do energije 7 TeV. (Z upoštevanjem, da je masa protona približno $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg $\approx 938 \frac{MeV}{c^2}$ in enačb 1–3 iz 1. poglavja v dodatku nas le lahek račun povede do ugotovitev, da bo LHC protone zmožgal pospešiti tudi preko 0.99999999 hitrosti svetlobe.) Od natančnih opazovanj trkov subatomskih delcev pri tako velikih hitrostih si znanstveniki obetajo nove ugotovitve o obstoju, rojstvu in razvoju našega materialnega sveta (in vesolja). (Glej 6. poglavje v dodatku.)

⁷⁶Po poljudnih podatkih iz CERN-a naj bi bil en sam dipolni magnet v LHC težji od celotnega Eifflovega stolpa v Parizu, takih magnetov pa je 1 232.

⁷⁷Peter Higgs, rojen 1929, britanski teoretski fizik. (Glej *Daljšje opombe*.)

⁷⁸Teorija superstrun zaobjema poskuse, da bi v fiziki v enotno teorijo povezali teorijo

viti okvir za razlago vseh fizikalnih vprašanj, a jaz v to ne verjamem. Sicer imamo zgodovinski primer, ko je Einstein skoraj povsem brez eksperimentalnih podatkov razvil brezhিবno splošno teorijo relativnosti, to je klasično teorijo gravitacije. Šele potem je na podlagi teorije razložil precesijo perihelija Merkurja in druge pojave, ki so eksperimentalno potrdili teorijo. O dokončni teoriji, ki bi vsaj v načelu rešila vse možne fizikalne probleme, so razmišljali mnogi veliki fiziki. Niels Bohr, na primer, je verjel, da je taka teorija možna, ni pa pričakoval, da bi jo človeštvo v bližnji prihodnosti našlo. Fizike zato čaka še dolga pot. Med okvirno pričakovano maso Higgsovega delca in *Planckovo maso*⁷⁹, ta je največja masa enega samega delca⁸⁰, ki si jo še lahko predstavljamo, je še vedno šestnajst redov velikosti. In prav tu, verjamem, smo in bomo eksperimentalno omejeni. Eno mojih prvih posebnih predavanj v Münchnu je bilo o pospeševalnikih in uporabil sem knjižico S. Livingstona⁸¹, ki je bil takrat eden vodilnih fizikov na področju razvoja pospeševalnikov. V uvodu je imel zgodovinski pregled razvoja pospeševalnikov od Cockcroft-Waltonovega⁸² do Van de Graaffovega in naprej. Van de Graaffov pospeševalnik, na kakršnem sem delal v Københavnu s Huusom in kakršen je tudi v Ljubljani, je dosegal napetost 2 MV. Ista tehnologija je omogočila energije protonov nekje do 20 MeV. Pri teh energijah se je ustavilo in potrebne so bile popolnoma nove tehnologije. Podobno je bilo s ciklotronom. Tisti, ki so ga imeli v Københavnu, je zmožeg pognati protone do 4 MeV in z istim principom pospeševanja so prišli nekje do 20 MeV. Tako je vsak nov princip pospeševanja delcev dvignil možne energije in takrat je Livingston v svoji knjigi predstavil graf⁸³ pospeševalniških energij v odvisnosti od časa, ki so rasle eksponentno. Temu grafu sem jaz dodal graf cene posameznega pospeševalnika, ki je bil tudi eksponenten. Sicer je imel ta

osnovnih delcev in teorijo osnovnih sil (elektromagnetno, močno, šibko in gravitacijsko).

⁷⁹Poimenovana po nemškem fiziku Maxu Plancku (1858–1947), enem izmed najpomembnejših fizikov iz začetka dvajsetega stoletja. Max Planck je prejel Nobelovo nagrado leta 1918.

⁸⁰Standardni model ne ponuja določnejših napovedi mase Higgsovega delca. Ob najnižjih ocenah Higgsove mase (okrog 120 GeV), bi se standardni model fizike brez upoštevanja kvantnih efektov gravitacije nekako obnesel vse do energij Planckove mase, ki ustreza 1016 TeV oziroma $2 \cdot 10^{-8}$ kg. Najvišje ocene Higgsove mase okrog 1 TeV bi že vodile v težko razločljive nekonistentnosti standardnega modela fizike osnovnih delcev. Planckova masa pomeni mejo, pri kateri postane standardni model fizike osnovnih delcev nemočen in kvantna gravitacija neizogibna, saj je medsebojna odvisnost kvantne mehanike in splošne teorije relativnosti z upoštevanjem gravitacije nujna.

⁸¹Milton Stanley Livingston (1905–1986), ameriški fizik. (Glej 3. poglavje v dodatku.)

⁸²Leta 1932 Cockcroft-Waltonov generator doseže napetost 700 kV. Že s 125 keV protoni Cockcroft in Walton razbijeta atom litija, za kar sta leta 1951 prejela Nobelovo nagrado.

⁸³Livingstonov graf je mogoče najti na spletu. Na tem mestu naj omenimo, da so energije trkalnikov v težiščnem sistemu 2E pogosto pretvorjene v ekvivalentne laboratorijske energije E_{lab} po enačbi (4) v 6. poglavju dodatka.

graf manjšo strmino in vsekakor je bil vsak z novejšo tehnologijo pridobljen MeV cenejši. A z ekstrapolacijo te funkcije cene v prihodnost sem nekje v začetkih sedanjega stoletja – kdaj natančno, se več ne spomnim – prišel do cene, ki ustreza bruto letnemu dohodku celotnega planeta. Taka razmišljanja napovedujejo konec napredka pospeševalnikov in trkalnikov. Tudi pri odkritju popolnoma novih principov pospeševanja se pojavijo drugi problemi. Splošen problem v načrtovanju pospeševalnikov je ta, da se *preseki* za zanimive reakcije, ki bi lahko pokazale kaj novega, manjšajo. To pomeni, da moramo v iskanju novih rezultatov z vse večjimi energijami streljati na vse manjše tarče, da bi sploh lahko zadeli tisto, kar želimo. Tako so *preseki* za produkcijo Higgsovih delcev izjemno majhni. Praktično to pomeni, da je treba imeti v curku čedalje več pospešenih delcev. Pri LHC in tudi že pri prejšnjih linearnih pospeševalnikih je energija curka v pospeševalniku tako velika, da bi nekontroliran pobeg curka uničil pospeševalnik. Curkov s tako veliko energijo pa ni lahko obvladati. Ameriški fizik, nobelovec in velik strokovnjak za pospeševalnike Richter⁸⁴ je imel pred časom v CERN-u zanimivo predavanje, v katerem je utemeljeval pospeševalniške težave in omejitve, ki jih prinašajo tako velike energije v curku. Potrebna energija curka namreč raste približno s kvadratom energije posameznih delcev.

Lahko še kaj poveste o drugih velikih imenih fizike, kot sta na primer George Charpak⁸⁵ in Carlo Rubbia⁸⁶, ki ste jih srečali v svoji znanstveni karieri?

Charpak, Rubbia in Van der Meer⁸⁷ so vsi delali v CERN-u in dobili Nobelove nagrade. To so bile doslej edine tri Nobelove nagrade neposredno povezane z raziskavami v CERN-u. Zanimivo je, da sta leta 1984 delila Nobelovo nagrado Rubbia za dosežke pri eksperimentu in van der Meer kot najzaslužnejši inženir pri dogradnji tedanjega največjega CERN-ovega pospeševalnika SPS⁸⁸ v trkalnik *proton-antiproton*, ki je te eksperimente

⁸⁴Burton Richter, rojen 1931, ameriški fizik, Nobelova nagrada 1976.

⁸⁵Georges Charpak (1924–2010), poljsko-francoski fizik judovskega porekla. (Glej *Daljša opombe*.)

⁸⁶Carlo Rubbia, rojen 1934, italijanski fizik (doma iz Gorice), ki je prejel Nobelovo nagrado (skupaj s Simonom van der Meerom) leta 1984 za odkritje bozonov W in Z. Ameriški fizik in novinar Gary Taubes je napisal zanimivo knjigo o Rubbijevi poti do Nobelove nagrade: *Nobel Dreams; Power, Deceit, and the Ultimate Experiment*, Random House N. Y. 1986.

⁸⁷Simon van der Meer, rojen 1925, nizozemski pospeševalniški strokovnjak, čigar ideje so omogočile gradnjo oziroma nadgradnjo pospeševalnika SPS do trkalnika *proton-antiproton*, ki je omogočil odkritje bozonov W in Z. Skupaj s Carlom Rubbio je van der Meer za te dosežke leta 1984 prejel Nobelovo nagrado.

⁸⁸*Super Proton Synchrotron* (SPS) je skoraj 7 km dolg pospeševalnik v CERN-u, ki je začel delovati leta 1976 z dosegom 400 GeV. Istega leta je pospeševalnik v *Fermilabu* v ZDA, ki je dosegel 500 GeV, že posekal pospeševalnik SPS. Doseg SPS-a ni zadoščal za produkcijo W in Z bozonov. Z idejami in delom mnogih, še posebej pa van der Meera in

omogočil. V CERN-u sta bila takrat dva direktorja. Gradnjo pospeševalnika je vodil Adams⁸⁹, ki je bil izjemen človek. Po rodu Anglež, po izobrazbi pa celo brez univerze; kljub temu je postal vodilni strokovnjak za področje pospeševalnikov in tehnični direktor CERN-a. Raziskovalni direktor je bil pa teoretski fizik Van Hove⁹⁰. Ideje, ki so pripeljale do gradnje trkalnika *proton-antiproton*, so bile izredne, a pred voditelji, kot je bil Van Hove, so bile izjemno težke menedžerske odločitve in veliko tveganje. Takrat je bil v gradnji trkalnikov velika avtoriteta norveški fizik Johnsen⁹¹, ki je prej vodil gradnjo prvega trkalnika proton-proton na svetu, imenovanega ISR (*Intersecting Storage Ring*), ki je bil takrat podobno zahteven in tvegan projekt. Johnsen je bil ob začetkih gradnje novega trkalnika proton-antiproton zelo skeptičen. Menil je, da je nemogoče, da bi številne optimistične ocene obveljale in ena sama napaka pri teh ocenah bi lahko pomenila neuspeh. Pa se je spet izkazalo, da so bile pravilne najbolj drzne ideje, to so bile ideje predvsem van der Meera in Rubbie, za kar sta bila nagrajena z Nobelovo nagrado.

Fiziki iščejo Higgsov (imenovan tudi božji⁹²) delec. V poljudnem tisku lahko beremo o nevarnosti, da bo LHC ustvaril črno luknjo, ki nas bo vse požrla. Mnogi si upamo govoriti o materiji in antimateriji, o ekvivalenci med energijo in maso, kot da smo res samo korak do tega, da bo vsak osnovnošolec razumel in suvereno znanstveno razlagal *genezo velikega poka*. Kako banalne in kako poenostavljene so te zgodbe, ki jih kot bistvo znanstvenih fizikalnih spoznanj slišimo med preprostimi ljudmi? So poenostavljeni modeli za fizikalno neizobražene kaj bližje resnici o bistvu materialnega sveta, kot je simbol boga z žezlom in sivo brado blizu odgovorom teološke⁹³ in ontološke⁹⁴ negotovosti človeškega bivanja?

Carla Rubbie, so pospeševalnik SPS do leta 1981 dogradili do trkalnika *proton-antiproton*, v katerem so curki protonov in antiprotonov krožili v nasprotnih smereh in pri trkih dosegali težiščne energije do 700 GeV (LHC: do 14 000 GeV), kar je omogočilo produkcijo in odkritje bozonov W in Z.

⁸⁹ Sir John Bertram Adams (1920–1984), britanski znanstvenik, strokovnjak za pospeševalnike in vrhunski znanstveni menedžer. (Glej *Daljša opomba*.)

⁹⁰Léon Van Hove (1924–1990), belgijski fizik, ki je raziskovalno posegal na skoraj vsa področja fizike, pa tudi v matematiko in kozmologijo.

⁹¹Kjell Johnsen (1921–2007), norveški elektroinženir, ki je vodil gradnjo ISR (Intersecting Storage Rings) trkalnika v CERN-u.

⁹²Ime *božji delec* pride od naslova poljudne knjige: *The God Particle. If the Universe is the Answer, What is the Question?* A Mariner Book 1993, ki jo je napisal Leon Lederman (glej opombi 59 in 60) s sodelovanjem Dicka Teresija. Slednji je menda predlagal ime „božji“ delec.

⁹³Teologija kot veda o bogu in temeljnih stvareh bivanja, kot racionalno razmišljanje o religioznih vprašanjih, ki naslavlja vzrok in smisel bivanja. Tudi kot veda o bogu v judovskem smislu, ki pravi, da je boga nemogoče razumeti ali poznati.

⁹⁴Ontologija kot veda, ki poskuša opisati naravo, osnove ter vzroke bivanja in obstoja.

(Nasmeh.) Da bi te stvari razumeli, je potreben dolg študij. Treba je vedeti ogromno fizike in še prej matematike, da se lahko vsaj približate dejanskemu dojemanju tega, kar razume vrhunska fizika. Univerza ni niti približno dovolj. Zase lahko rečem, da sem po univerzi potreboval vsaj še deset let intenzivnega študija, da sem lahko vsaj načelno razumel današnjo fiziko. Splošne teorije relativnosti se na primer nisem nikoli naučil, ker je nisem potreboval. Šele po tolikšnem času in študiju pride človek do splošnih znanj in uvida, ki mu omogoča, da se nauči potrebnih podrobnosti posamezne specialne teorije, v katero se potem poglobi. To pomeni, da pride človek šele takrat do robov že znanega na zelo specialnih področjih in šele tam se potem lahko pravo raziskovalno delo začne. Torej lahko rečemo, da potrebuje povprečen človek, kot sem jaz, po univerzi vsaj še deset let študija, da se približa načelnemu razumevanju fizike. Za neizobraženega laika je to nemogoče. Fiziki zato ljudem lahko pripovedujejo le pravljice. Kar najdete v časopisih, so poljudne zgodbe, ki za fizike, ki ta vprašanja dejansko razumejo, lahko celo zaobjemajo posamezne aspekte znanosti, a za nepoučenega ostajajo le pravljice. Analogija 'vsemogočnega boga z žezlom', ki naj bi poosebljal odgovore na najtežja duhovna vprašanja človeškega bivanja, je povsem primerna.

Je življenje v utvari razumevanja lažje kot negotovost nerazumevanja?

Mogoče. Najbrž je za to, da veste, da ne razumete, treba že veliko razumevanja. Spomnim se napetega in dolgega pogovora o perspektivah za najdbo novih virov energije, v katerem sta poleg naju z ženo sodelovala še en fizik in ena profesorica umetnostne zgodovine ali podobne humanistične smeri. Pogovarjali smo se pred kakšnimi tridesetimi leti, pa se vseeno še zelo dobro spomnim osnovnega tona pogovora. Po večurni razpravi, v kateri sva bila oba fizika precej zaskrbljena, saj v modernih raziskavah fizike ni ničesar, kar bi obetalo radikalno nove vire energij, je omenjena profesorica optimistično izjavila, da je prav nič ne skrbi, ker je prepričana, da bomo fiziki že našli kako rešitev. Očitno bistva pogovora sploh ni razumela, da namreč mi fiziki, ki nam zaradi našega znanja tudi ona zaupa, ne moremo pričakovati ničesar fundamentalno novega. Z drugimi besedami, da možni odgovori na vprašanja fizike, ki so še neznan, v bližnji prihodnosti ne obetajo ničesar novega na področju energij.

Prav skrb tistih, ki razumejo, bi morala skrbeti one, ki ne razumejo, pa je pogosto obratno?

Ja, če pač ne razumete kočljivosti situacije, vas ta najbrž ne more skrbeti. Razumevanje vrhunske fizike je res zahtevno, a na osnovnem nivoju razumevanja klasične fizike bi bilo po mojem mnenju mogoče storiti veliko. Že s srednješolsko fiziko bi bilo možno razložiti veliko nevarnosti, ki jih prinaša moderni, energijsko zelo potratni način življenja.

Ali ni res, da fiziki iščete resnico narave? Da razkrivate zakone, ki vladajo (materialnemu) svetu? Da torej verjamete v zakonitosti, ki so v stvari sami, še preden vemo zanje? Nekateri pa se, da bi se izognili odgovornosti, povsem laično in napačno sklicujejo na pojme, kot so načelo nedoločenosti⁹⁵, teorija relativnosti⁹⁶ in kaos⁹⁷, čeprav slednji povedo več o mejah človeškega razumevanja kot o kaotičnosti zakonov narave. Ali niste fiziki v skorajda religioznem odnosu do resnice, medtem ko je v svetu vedno več relativizma in je *legitimnih resnic* že skoraj toliko kot ljudi?

O tem so filozofirali mnogi fiziki. Tudi Einstein in Bohr. Znan je Einsteinov rek, da je čudež, da je mogoče naravo razumeti in razlagati v jeziku matematike. Tudi Bohr je pogosto izražal svoje navdušenje nad resnico narave, ki se počasi razkriva človeku. A tu gre za popolnoma drugačno, globoko in resno razpravljanje o resnici, ki ni v ničemer podobna občemu relativizmu ali pravljičam, ki naj bi dokazale ali ovrgle resnico. V pogovoru z vami prof. Vidav omenja knjigo *Richarda Dawkinsa Bog kot zabloda*⁹⁸. Tudi sam sem prebral to knjigo in ob njej se človek lahko le nasmehne. Dawkins kritizira in razpravlja o najpreprostejših in primitivnih aspektih religij. O bogu pa ne pove prav ničesar. Podobno bi lahko razpravljali o najpreprostejših in primitivnih modelih, o pravljičah, o katerih sva govorila prej, ki poskušajo na preprosti ravni razložiti vrhunsko fiziko. Kot fizik verjamem, da naravi vladajo natančni zakoni, ki se jih trudimo razumeti. Podobno, kot je v kritiki Dawkinsove knjige zapisal neki nemški novinar: če hočemo biti ob teh vprašanih resni, se moramo vprašati, zakaj sploh svet obstaja, kako to, da preprosto ni ničesar, zakaj ni nič, kar bi bilo sicer tudi možno in še bolj enostavno. Zakaj se to sploh sprašujemo? V tem smislu sem sam zagotovo religiozen človek. Verjamem namreč, da obstajajo zakonitosti, ki vodijo naravo in svet, ki bi si jih lahko zamislilo le bitje, neskončno pametnejše od človeka.

Karkoli že to pomeni!?

Ja, karkoli že to pomeni. Spomnim se verouka v klasični gimnaziji, kjer smo študirali tudi sholastične dokaze o obstoju boga. To seveda ni znanost kot fizika. Jaz pravim, da so bili to prvi poskusi znanstvenega razmišljanja,

⁹⁵ *Heisenbergovo načelo nedoločenosti* je eno temeljnih načel kvantne mehanike; v zelo poenostavljenem jeziku pravi, da se poznavanje lege in gibalne količine delca medsebojno izključujeta: čim natančneje poznamo eno količino, manj lahko povemo o drugi.

⁹⁶ Einsteinova teorija relativnosti – (Glej *Daljšje opombe.*)

⁹⁷ *Kaos*: V poenostavljenem matematičnem jeziku kaos pomeni determinirano obnašanje, ki pa je zelo občutljivo na spremembe „začetnih pogojev“. Že infinitezimalno majhne spremembe „izhodiščnih pogojev“ namreč lahko povzročijo velike spremembe obnašanja „kaotičnega sistema“.

⁹⁸ Pogovor s prof. Ivanom Vidavom ob 40. obletnici smrti prof. Josipa Plemlja, *Obzornik mat. fiz.* **54** (2007), št. 6.

ko so se razmišljanja o bogu odmaknila od preproste vere, da nekdo skrbi, da boš za dobro nagrajen in za slabo kaznovan. Glede na razumnost in genialnost, s katero je narejen svet, so naši poskusi, da bi razumeli, dokazali ali ovrgli obstoj boga podobni, kot če bi bakterija v laboratorijski epruveti hotela razumeti znanstvenika, ki jo proučuje.

Ali tako kot za fizika obstaja resnica, tudi če mu še ni popolnoma poznana, za človeka obstaja moralna resnica, moralni prav in narobe?

Pristojnost in odgovornost pri določanju moralnega *prav* ali *narobe* sta nejasni. To zagotovo ni v pristojnosti fizika. Najbrž bi to moral biti humanistični projekt človeštva, tako kot je iskanje fizikalnih resnic o obstoju materialnega sveta projekt vsega človeštva. Fizik implicitno seveda verjame v resnico in v trdne naravne zakone že mnogo prej, preden jih pozna, saj ta vera in vedenje, da resnica obstaja, oblikujeta motiv, da bi resnico spoznali. Pri moralni resnici je veliko težje karkoli dokazati, čeprav se moralne resnice zdijo veliko lažje razumljive od fizikalnih. A tu je veliko več egoističnih interesov, ki onemogočajo dejanski humanistični napredek. Zelo čudno in nesmiselno bi bilo verjeti, da do nekod (v materialnem svetu) vladajo tako usklajeni zakoni kozmosa, od tod naprej (v duhovnem svetu) je pa kaos. Če je sploh možno kaj razumeti, je načelno možno razumeti vse, torej tudi moralne resnice in celo boga. Seveda pri predpostavki neskončne pameti. Kot bi se lahko omenjena bakterija nekega dne tako razvila, da bi končno razumela znanstvenika in to, da znanstvenik eksperimentira z njo.

To bi bil le en nivo višje. Ko bi namreč bakterija spoznala človeka, bi spoznala, da človek ugiba, kdo je bog . . .

(Nasmeh.) Ja, seveda, saj samo v takem neskončnem ciklu novih spoznanj si je moč predstavljati neskončno pamet.

Kako pomembno za razvoj človeka in izobraževanja je razumevanje in raziskovanje teh temeljnih zakonov in resnic sveta, ki jih opisujeta fizika in matematika?

Jaz rad razlikujem med matematiko in naravoslovjem oziroma fiziko. Moja hčerka je študirala ekonomijo in vedno primerjam odnos med matematiko in fiziko z odnosom med ekonomijo kot teoretično znanostjo in poslovanjem. Ekonomijo rabimo za razumevanje in načrtovanje, medtem ko so poslovni vodje podvrženi drugim, popolnoma konkretnim zakonom. Matematika in ekonomija na podlagi aksiomov in izpeljanih zakonov razvijata teorije možnih svetov, fizika in poslovno vodenje se pa nenehno preizkušata v praksi. Teorijo, tudi če je še tako dobra in pravilna, moramo dopolniti ali nadomestiti z novo, če se z eksperimenti izkaže, da ne opisuje opazovane stvarnosti. Seveda so teorija in sistemi aksiomov še kako pomembni, saj poskušajo zaobjeti bistvo obstoječega in izluščiti pomen teorije. Diferencialna geometrija se je razvila, ko so matematiki v sistemu Evklidovih aksiomov zavrgli aksiom

o vzporednih premicah. Posplošeno neevklidsko geometrijo je uporabil Einstein za razvoj splošne teorije relativnosti (t. j. klasične teorije gravitacije), ki so jo kasneje potrdili eksperimenti (to sva omenjala že prej). Na elementarni ravni, kjer ne razmišljamo o tem, kaj bi se zgodilo, če bi v sistemu aksiomov kaj spremenili, se pa tega sistema ne spleča študirati. Pri predavanjih v prvem letniku sta prof. Plemelj in prof. Vidav namesto Peanovih aksiomov rekla, da je bog dal naravna števila, vse drugo pa lahko definiramo sami.

Teorije so poskusi opisov našega razumevanja dejanskega sveta, ki ga znanost vedno znova preverja in dopolnjuje. Ali nista v tem smislu matematika in fizika za vzgojo in razgledanost človeka izjemno pomembni, saj povezujeta izkustvo in razmišljanje, ki v največji meri oblikujeta človeka kot posameznika in družbo kot celoto?

Tu načenjate novo težko vprašanje. C. P. Snow⁹⁹ je govoril o dveh „kulturah“. V angleščini imamo za to dve besedi: „sciences“ in „humanities“. V slovenščini in nemščini imenujemo obe „znanosti“ in razlikujemo med naravoslovno-matematičnimi in humanističnimi znanostmi. Snow je tožil, da zija prepad med tema dvema „kultutama“. Za povprečnega človeka je mogoče, da si tako rekoč „kontinuirano“ izboljšuje znanje (in morda tudi razumevanje) neke humanistične znanosti (na primer literarne zgodovine). Kot sva govorila zgoraj, je to pri naravoslovno-matematičnih znanostih veliko težje. Posledica je nerazumevanje ali celo zaničevanje naravoslovno-matematičnih znanosti med „kulturniki“. Bojim se, da razglabljanja, ki jih načenja vaše vprašanje, pri tem ne bi prav nič pomagala. Nasprotno, diskusija bi nama prinesla le očitek lastne hvale, ki je povsem nekoristen.

Na kaj izmed veliko stvari, ki ste jih v življenju dosegli, ste najbolj ponosni?

Zakaj bi bil pa na to ponosen? Uspehi v življenju so delno rezultati slučajnosti in sreče. Kot takrat, ko sem dobil dansko štipendijo. Imel sem srečo in življenje bi se lahko zasukalo precej drugače, če takrat ne bi odšel na Dansko. Pomemben je bil vpliv tako staršev, ki so me že kot otroka usmerjali v učenje in študij, kot tudi lastne ambicije. Spomnim se, ko sem imel 8 ali 9 let, so mi starši najeli učiteljico francoščine, ki je bila zelo stroga. Dobila sva se dvakrat na teden in vsakič sem se moral naučiti na pamet eno stran proznega teksta. Seveda sem se včasih učil tudi v zadnjem trenutku in so me starši napodili spat, pa niso vedeli, da sem se potem učil na skrivaj še v postelji pod odejo z žepno svetilko. Brez ambicij človek ne more veliko doseči v življenju. Brez veliko vztrajnega dela pač ni nič, pamet sama ne zadošča.

⁹⁹ Charles Percy Snow (1905–1980), je bil angleški fizik, pisatelj in politik, ki je postal posebej znan s svojim predavanjem „*The Two Cultures*“ leta 1959, v katerem opisuje po njegovem mnenju ključni vzrok za „svetovne probleme“, to je prepad med kulturama „znanstvenikov“ in „literatov“ ter njuno medsebojno nerazumevanje in aroganco.

Se strinjate, da ambicija in trdo delo ločuje uspešne od neuspešnih?

Ja, seveda, a po drugi strani imam prijatelja Američana, ki pravi: „*There is no substitute for brains!*“ Torej je za uspeh potrebno oboje. Ogromno se lahko nadomesti s trdim delom in vztrajnostjo, a zagotovo največ dosežejo tisti, ki imajo obojega v obilju. In še pameti je več vrst. Na primer, Carlo Rubbia je eden najinteligentnejših ljudi, kar sem jih kdaj srečal. Tako neznansko hitro razmišlja in dojemata, da vas zmeraj znova preseneča, saj razume, kaj želite povedati, že ko dokončate polovico stavka. Res, malo je inteligentnejših od Carla Rubbie glede na inteligenco, ki jo določajo inteligenčni testi, ki ponavadi zahtevajo hitrost. Je seveda tudi izjemno ambiciozen človek, sicer ne bi prišel do Nobelove nagrade. Dobite pa ob njem občutek, da nima časa globoko razmišljati. Po drugi strani se spomnim nemškega fizika, ki je bil moj študent in je tudi delal s Carlom Rubbio v CERN-u. Če ima in si vzame dovolj časa, bo privrtal do dna vsake misli, ne zna pa hitro razmišljati. Nesreča je hotela, da je končal kot eksperimentalni fizik, kjer mislim, da je veliko pomembneje, da znate misliti hitro, kot pa globoko. Za teoretika je pa globoko mišljenje odločilno, hitrost je postranska.

Kaj bi svetovali mladim?

(Nasmeh.) Ne vem. Mlade slabo poznam. Imam hčerko in vnuke, sicer pa nimam veliko stikov z mladimi. Mislim pa, da mladi ne potrebujejo nasvetov. Čaka jih težko življenje in zelo drugačno od našega, kako naj jim torej dajemo nasvete? Jaz sem žal pesimist, kar se tiče prihodnosti in razvoja sveta. Morda je edino pravo upanje znanost (na primer biologija), ki bi prinesla kaj čisto novega, da bi lahko spremenili in rešili nekatere temeljne probleme, kot so energijski problemi, problem onesnaženja, problemi, ki jih prinaša potrošništvo in globalizacija. Bojim se, da se bodo ti problemi v tem stoletju tako razmahnil in povečali, da nas ne čaka rožnata prihodnost. Jaz na srečo tega ne bom več dočakal, mladim pa nič ne zavidam življenja v razmerah, ki prihajajo. Mnogi moji prijatelji in znanci, vključno z mojim zetom, so večji optimisti in verjamejo, da je človek izjemno prilagodljiv in da se bodo rešitve že našle. Zagotovo bo napredovala tudi tehnologija in težko si je zamišljati, kaj še pride. Samo pomislimo, kakšno je bilo življenje pred sto leti, ob začetku dvajsetega stoletja. Res takrat najbrž nihče ni mogel napovedati konca stoletja, kot smo ga doživeli v dobrem in slabem. Upam, da se motim, a občutek imam, da so pred človeštvom hude socialne krize. Jaz samo upam, da krize ne bodo pripeljale do voditeljev, kot je bil Hitler, čeprav so mnogi dogodki v politiki bolj strašljivi kot spodbudni.

Glede na vaš pesimizem, ki najbrž izhaja iz sveta, za katerega smo odgovorni odrasli – kaj bi svetovali staršem, učiteljem in generaciji, ki smo odgovorni za to, da je vaša misel na prihodnost tako pesimistična? Kaj naj rečemo mladim, da ne bi ponovili naših napak?

Na svetu je veliko preveč egoizma. Na Zahodu je popularno govoriti, da so za slabšanje razmer na planetu krivi Kitajci in Indijci, ki hočejo živeti tako udobno kot mi, posledice so pa katastrofalne za ves svet. Seveda si želijo tega, kar imamo na Zahodu, saj to je naravno. Ne vem, mnogo preveč egoizma je na svetu. Človek je pač egoističen in z vzgojo se da doseči marsikaj, a ne vem, kako bi lahko z vzgojo premagali človeški egoizem. Nekako je videti, da je naravni razvoj človeka po Darwinu iz nas naredil egoiste. Vsak misli nase in mogoče še malo na svojo družino ali celo na narod, potem se pa solidarnost, razen na papirju, konča. Ja, premagati človeški egoizem bi bil eden največjih uspehov za človeštvo.

Profesor Zupančič, lepa hvala za pogovor.

Daljše opombe

⁶*Klasična gimnazija v Ljubljani* je bila šola, katere začetke delovanja bi lahko postavili v leto 1563, ko se je začelo protestantsko latinsko šolanje. Na šoli so vsaj od leta 1854 poučevali tudi slovenščino. V številnih šolskih reformah se je šola ohranila do leta 1958, ko je šolska reforma dokončno spremenila osemletno gimnazijo in vpeljala obvezno osemletno osnovno šolanje. Pouk klasičnih jezikov je v Sloveniji ostal skoraj neokrnjen vse do leta 1965. Klasična gimnazija v Ljubljani je bila znana predvsem po klasični izobrazbi s področja humanistike in (klasičnih) jezikov, obiskovali so jo številni znani Slovenci. Šola je dobila slovensko ime po prvi svetovni vojni kot *Prva državna gimnazija v Ljubljani*, po drugi svetovni vojni pa se preimenuje v *Klasična gimnazija v Ljubljani*. *Klasična gimnazija v Ljubljani* je v letih 1899–1958 domovala v poslopju današnje *Osnovne šole Prežihov Voranc* na Prežihovi ulici št. 8 v Ljubljani. Nekaj tradicije izobraževanja klasičnih jezikov iz minule *Klasične gimnazije* sta po šolski reformi leta 1965 podedovali *OŠ Prežihov Voranc* in *Šubičeva gimnazija*.

¹⁶Ivan Supek (1915–2007), profesor jedrske fizike na zagrebški univerzi, filozof in pisatelj. Doktoriral je pri Wernerju Heisenbergu (glej opombo 38). Zaradi protifašistične aktivnosti je bil leta 1941 aretiran in po posredovanjih Heisenberga izpuščen. Prof. Supek je bil menda dober znanec tako Heisenbergove kot Bohrove družine. Bil je tudi glasen pacifist in kritik militantne politike, od pozivov proti uporabi jedrske bombe leta 1944 (torej več kot leto pred Hirošimo), do veliko poznejše odkrite in javne kritike hrvaškega predsednika Franja Tuđmana. Prof. Supek je bil član Jugoslovanske in Hrvaške akademije znanosti. Med njegovimi literarnimi deli je najbolj znana novela *Proces stoletja*, v kateri opisuje sodni proces proti Robertu Oppenheimerju. Profesor Supek ima tudi zanimivo interpretacijo srečanja med Bohrom in Heisenbergom – primerjaj opombo 39. (Link na intervju s prof. Supkom v Jutarnjem listu, ki govori tudi o srečanju Heisenberg-Bohr, maj 2011: <http://www.jutarnji.hr/moj-zivot-s-nobelovcima-20-stoljeca/23289/>)

¹⁷Pavle Savić (1909–1994). Srbski kemik in fizik. V letih 1937–1938 je v Parizu sodeloval z Nobelovo nagrajenko za kemijo Irène Joliot-Curie (1897–1956). Njuno delo je vodilo do odkrija Otta Hahna in Fritza Strassmanna o jedrski cepitvi urana, kar je omogočilo atomsko bombo. Irène Joliot-Curie je bila hčerka Marie in Pierra Curie. Nobelovo nagrado za kemijo je prejela leta 1935 skupaj s svojim možem Fredericom Joliot-Curie za odkritje kratkoživih radioaktivnih izotopov, ki jih je mogoče pridobivati samo z jedrskimi reakcijami. Profesor Savić je bil glavni akter ustanovitve jedrskega inštituta Vinča. Savić je bil tudi član in v letih 1971–1981 predsednik Srbske akademije znanosti in umetnosti.

²¹Ljubljanski betatron je bil kupljen pri takratni švicarski firmi Brown Boveri (danes del švicarsko-švedske korporacije ABB) in je dosegal 30 MeV. V Ljubljani ga je bistveno izboljšal Darko Jamnik (glej opombo 23) in ga s tem šele usposobil za jedrske raziskave. Danes so betatroni zastareli. V raziskovalni fiziki se ne uporabljajo več. Tudi v medicini (obsevanje rakastih tvorbo) in v tehniki (na primer za presevanje debelih slojev snovi) so jih nadomestili linearni pospeševalniki (okrajšano „linaki“). (Glej še 1. poglavje v dodatku.)

³⁴*Inštitut Nielsa Bohra za teoretično fiziko* je del *Inštituta Nielsa Bohra za astronomijo, fiziko in geofiziko* na Univerzi v Københavnu. *Inštitut za teoretično fiziko* – kot se je takrat imenoval – je na Univerzi v Københavnu, kjer je bil profesor od leta 1914, ustanovil Niels Bohr leta 1921. Ob 80. rojstnem dnevu Nielsa Bohra (7. 10. 1965) je *Inštitut za teoretično fiziko* Univerze v Københavnu uradno postal *Inštitut Nielsa Bohra*. Do druge svetovne vojne je bil inštitut eden od centrov evropskih in svetovnih raziskav atomske in kvantne fizike.

³⁷V poznem 19. stoletju je pivovarska družba Carlsberg zelo obogatela. Njen ustanovitelj Jacob Christian Jacobsen (1811–1887) je leta 1876 ustanovil *Fondacijo Carlsberg*, ki je na njegovo željo postala lastnik pivovarne, obenem pa je bil namen fondacije sponzoriranje raziskav, umetnosti in drugih nacionalno pomembnih dejavnosti. Ustanovljen je bil *Carlsbergov laboratorij* za promocijo raziskav v fiziki, kemiji, matematiki, filozofiji ter humanističnih in socialnih znanostih. Laboratorij upravlja pet zaupnikov, ki jih voli *Danska akademija znanosti*. Zaradi spora s sinom Carlom je ob smrti Jacoba celotno premoženje J. C. Jacobsena pripadlo *Fondaciji Carlsberg*. Po smrti sina Carla leta 1902 je tudi premoženje Carla Jacobsena in *Nove Carlsberške pivovarne*, ki jo je Carl ustanovil, prešlo na Fondacijo Carlsberg. V upravljanju današnje družbe Carlsberg ohranja *Fondacija Carlsberg* 51 % glasov in vsaj 25 % kapitala. Zaupniki, ki jih imenuje *Danska akademija znanosti*, so člani uprave družbe in predstojnik *Fondacije Carlsberg* je hkrati generalni direktor družbe Carlsberg. Že leta 1878 je *Fondacija Carlsberg* obnovila grad Frederiksborg, kjer domuje *Danski muzej nacionalne zgodovine*. V oporoki je Jacob Christian Jacobsen zapisal, da naj po njegovi in smrti njegove najožje družine njegov dom, to je dvorec Carlsberg, postane častni dom za ljudi, ki so se s svojim delom v znanosti ali umetnosti posebej odlikovali in ki jih določi *Danska akademija znanosti*. V oporoki je še zapisal, da bo, če dohodki izbranega častnega gosta Carlsbergovega dvorca ne bodo zadoščali za vzdrževanje, *Fondacija Carlsberg* prevzela manjkajoči del stroškov. Od takrat je dvorec Carlsberg ponudil domovanje številnim uglednim

ljudem, med drugimi tudi Einsteinu. Stalno je v dvorcu prvi domoval filozof Harald Høffding (1843–1931). Za njim pa je bil dvorec dom Nielsa Bohra od leta 1931 do 1962. O pomenu in časti, ki je pripadala dvorcu in njenim prebivalcem, govori tudi to, da je v dvorcu Niels Bohr leta 1957 gostil celo angleško kraljico Elizabeto II. Za Nielsom Bohrom so v dvorcu stalno prebivali še Johannes Broendsted v času 1963–1965, Bengt Stroemgren v letih 1967–1986, zadnji prebivalec Carlsbergovega dvorca pa je bil Søren Egerod (1923–1995), ki je v dvorcu domoval od leta 1988 do svoje smrti leta 1995. Zatem je *Fondacija Carlsberg* odločila, da hišo preuredi v *Carlsbergovo akademijo*.

³⁸Werner Karl Heisenberg (1901–1976), nemški fizik, poznan po *Heisenbergovem načelu nedoločenosti*, je prejel Nobelovo nagrado za fiziko leta 1932. Heisenberg je bil na čelu nacističnega jedrskega programa in je menda celo namenoma iz moralnih razlogov zaviral nastajanje nemške jedrske bombe, na srečanju z Bohrom leta 1941 pa naj bi nakazal, da je Nemčija tik pred dokončanjem jedrske bombe. V slovenščini imamo prevedeno Heisenbergovo knjigo *Del in celota (Der Teil und das Ganze)* (1969), ki je zanimiv (poljuden) zapis znanstvenega, političnega in moralnega ozračja iz časa rojevanja atomske bombe in konca druge svetovne vojne. Heisenberg opisuje številne zanimive dogodke in pogovore z Bohrom iz časa še pred začetkom druge svetovne vojne.

³⁹Leta 1922 (Bohrova Nobelova nagrada) je 21-letni Werner Heisenberg na Bohrovem predavanju v Göttingenu javno podvomil o Bohrovi matematični izpeljavi in s tem pritegnil Bohrovo pozornost. Le leto zatem je 22-letni Heisenberg doktoriral. Pozneje se je izpopolnjeval pri Bohru in postala sta prijatelja in velika sodelavca. Prijateljstvo je razpadlo z nacizmom in nemško okupacijo Danske leta 1940. Leta 1941 sta se Bohr in Heisenberg še sestala v Københavnu. Obstajajo različne interpretacije tega srečanja. Velika dramska uspešnica britanskega avtorja Michaela Frayna z naslovom *Copenhagen*, uprizorjena prvič v Londonu leta 1998 in na Broadwayu leta 2000 (s prek 300 uprizoritvami), povzema septembrsko srečanje leta 1941 med Bohrom in Heisenbergom. Po drami je bil posnet tudi film z istim naslovom. Po številnih mnenjih gre za razmeroma komercialno priredbo dogodkov, ki malo pove o dejanskem stanju na tistem srečanju. Heisenbergov študent, madžarsko-ameriški fizik svetovnega slovesa, član *projekta Manhattan* Edward Teller (1908–2003), znan tudi kot oče vodikove bombe, je bil prepričan, da je bil Heisenberg zavzet protinacist in za to navaja številne dokaze. Protislovnost različnih izjav pripisuje dejstvu, da je Heisenberg vedel, da mu nacisti prisluškujejo, celo med srečanjem z Bohrom leta 1941 v Københavnu, in je zato svoje izjave prirejal temu, da je lahko v nacistični Nemčiji sploh preživel. Teller je bil celo prepričan, da je Heisenberg sabotiral nemške raziskave na področju atomske bombe. Bohr je med drugo svetovno vojno postajal vnet borec proti nacizmu in jedrski tekmi. Ko je bil obveščen, da ga nacisti nameravajo aretirati, je leta 1943 pobegnil na Švedsko in zatem v London in ZDA. Postal je pomemben sodelavec pri ameriškem *projektu Manhattan* in pri delu tajnega laboratorija v Los Alamosu, kjer je nastajala ameriška atomska bomba. Po Bohrovih besedah Američani takrat niso več potrebovali pomoči pri izdelavi atomske bombe in je bila njegova vloga drugačna. Verjel je, da

bo največ storjeno za mir, če bodo ideje jedrskega znanja razširili med znanstvenike po vsem svetu. Sodeloval je z Oppenheimerjem (J. Robert Oppenheimer (1904–1967), ameriški jedrski fizik, vodja *projekta Manhattan*), ki ga je menda spodbudil, da je poskušal s protijedrskimi idejami prepričati predsednika Roosevelta. Pozneje je menda Bohra postalo strah, da bi Nemci prehiteli zaveznike in se je zavzemal celo za to, da bi skrivnosti *projekta Manhattan* delili z Rusi. Menda je o tem že prepričal Roosevelta, ki ga je poslal na sestanek s Churchillom, da bi prepričal še njega. To pa mu ni uspelo, Bohrove ideje je Churchill v pismu Rooseveltu označil z besedami, da bi Bohra morali zapreti, saj bi realizacija njegovih idej pomenila izdajstvo in najhujši zločin. Leta 1956 je Robert Jungk objavil knjigo *Brighter than a Thousand Suns* (*Svetlejšje kot tisoč sonc*), v kateri je bila objavljena tudi Heisenbergova interpretacija (Heisenberg je svojo interpretacijo Jungku opisal v pismu iz leta 1955) srečanja z Bohrom v Københavnu leta 1941, s katero se Bohr ni strinjal. Po objavi knjige je Bohr napisal več pisem Heisenbergu, a nobenega ni oddal. Šele leta 2002 je Bohrova družina dovolila vpogled v te osnutke Bohrovih pisem Heisenbergu, ki na dogodke daljnega leta 1941 v Københavnu mečejo drugačno, Heisenbergu manj naklonjeno luč.

⁴¹*Projekt Manhattan* je bil tajni zavezniški projekt raziskav s ciljem izdelati atomsko bombo v času druge svetovne vojne. Potekal je pretežno v laboratorijih v odmaknjenem in izjemno zavarovanem ameriškem oporišču v Los Alamosu v zvezni državi New Mexico v ZDA. *Projekt Manhattan* se je začel z Einsteinovim pismom (datirano z 2. 8. 1939) predsedniku ZDA Rooseveltu. V pismu (in naslednjih dveh) je Einstein informiral Roosevelta o novih spoznanjih v fiziki, ki omogočajo povsem nove vire energije, in tudi izrazil strah, da se v nemških laboratorijih na teh osnovah že pripravlja nov tip orožja. Zaradi strahu pred nemško atomsko bombo je Einstein Rooseveltu v pismu tudi natančno predlagal način, kako bi ZDA lahko prve prišle do takega orožja, in celo vire pridobivanja urana za potrebe takega projekta. Kmalu je stekel *projekt Manhattan*, ki ga je vodil ameriški jedrski fizik Robert Oppenheimer, v njem pa so sodelovali najvidnejši znanstveniki tistega časa (Fermi, Bethe, Szilard ...). Rezultati projekta so bili prva jedrska eksplozija (*Trinity*) in obe atomski bombi, vrženi na Hirošimo in Nagasaki. Tudi „silovita“ hladna vojna se je, po interpretacijah mnogih, začela v Los Alamosu s *projektom Manhattan*, saj je že takrat prihajalo do kočljivih zadev vohunjenja in do napetih odnosov z Rusi. Celotno vodja projekta Oppenheimer se je kot obtoženi za sodelovanje z Rusi znašel pred ameriško FBI. Albert Einstein je pozneje svoje pismo Rooseveltu, ki je začelo *projekt Manhattan* in posledično pripeljalo do atomskih bomb, označil kot največjo napako svojega življenja.

⁴⁵Otto Hahn (1879–1968), nemški kemik. Leta 1934 je zapustil profesuro na berlinski univerzi kot znak protesta proti suspendiranju judovskih profesorjev, še posebej Lise Meitner. Tudi pozneje sta skupaj z ženo Edith pogumno pomagala judovskim družinam v Berlinu, ki so bile žrtve nacističnega antisemitizma. Leta 1938 je pomagal Lise Meitner pri pobegu na Švedsko. Istega leta so njegova odkritja skupaj s Fritzom Strassmannom in Lise Meitner priznana kot odkritje cepitve jedra. Pri nevtronskem obstreljevanju urana sta Hahn in Strassmann odkrila barij 141.

Pojav sta s cepitvijo urana 235 razložila Meitner in Frisch. Ob koncu druge svetovne vojne je bil Hahn skupaj z drugimi nemškimi znanstveniki aretiran in deportiran v Veliko Britanijo, kjer je v priporu avgusta 1945 izvedel, da sta na Hirošimo in Nagasaki padli atomski bombi, ki sta bili nedvomno tudi plod njegovih odkritij. Hahn je bil tedaj zelo obupan. Novembra istega leta pa je tudi izvedel, da je prejel Nobelovo nagrado. Ker sta bila njegovo pridrževanje in lokacija vojaška skrivnost, ga *Švedska akademija znanosti* o tem ni mogla obvestiti in je za novico izvedel kot zapornik iz časopisov. Nobelovo nagrado je Hahn od švedskega kralja prejel osebno na svečani podelitvi Nobelovih nagrad naslednje leto, torej leta 1946.

⁴⁶Friedrich Wilhelm „Fritz“ Strassmann (1902–1980), nemški kemik, ki je leta 1938 skupaj z Ottom Hahnom odkril cepitev urana. Strassmann je bil tudi velik nasprotnik nacizma in je nosilec priznanja *Mučencev holokavsta*, v hebrejščini *Chassidey Umot HaOlam*, kar bi se lahko prevedlo kot *Zvesti človečnosti*. Priznanja so podeljevale judovske organizacije in država Izrael ljudem, ki niso bili judovskega porekla in so izpostavili svoj ugled in življenje, da bi v holokavstu pomagali Judom.

⁴⁷Prva atomska bomba z imenom *Little Boy* je bila odvržena na Hirošimo 6. 8. 1945. Bomba je tehtala približno 4000 kg. Glavno „eksplozivo“ je bilo le okrog 60 kg urana 235, od katerega je manj kot polovica kilograma dejansko „izgorela“ v jedrski reakciji cepitve jeder. Kinetična energija cepitvenih produktov je bila enaka približno 15 kilotonam TNT (približno 60 terajoulov) in je ubila okrog 140 000 ljudi. Zaradi redkosti izotopa urana 235 bomba tega tipa prej sploh ni bila preizkušena.

⁴⁸Druga atomska bomba z imenom *Fat Man* je bila odvržena na mesto Nagasaki 9. 8. 1945. Bomba je tehtala približno 4600 kg in z energijo prek 20 kiloton TNT (čez 80 TJ) je pokončala „le“ okrog 40 000, ranila pa okrog 25 000 ljudi. V primerjavi s prvo bombo je „majhno“ število žrtev pripisati hribovitemu terenu Nagasakija. Tehnologija te bombe je temeljila na cepitvi plutonija 239 in je bila že preizkušena z eksplozijo v puščavi *Nove Mehike* v ZDA, in sicer 16. 7. 1945. Prvi jedrski poskus, ki se je imenoval *Trinity*, je imel moč približno 20 kiloton TNT in se šteje za začetek *atomske dobe*.

⁵²Wernher Magnus Maximilian Freiherr von Braun (1912–1977), nemško-ameriški fizik in raketni inženir. Verjetno najvplivnejši raketni strokovnjak prejšnjega stoletja. Pred drugo svetovno vojno in med njo je bil vodilni razvijalec nemške raketne tehnike vključno z najbolj znanimi nacističnimi raketami V1 in V2. Leta 1945 so ga zajeli Američani in že leta 1955 je postal državljani ZDA in eden vodilnih pri razvoju ameriške raketne tehnike pri NASA. Med drugim je bil glavni direktor pri izdelavi rakete Saturn V, ki je ponesla Apollo na Luno. Leta 1975 je prejel najvišjo ameriško nagrado za dosežke v znanosti *National Medal of Science*.

⁵³Sergej Pavlovič Koroljov (1907–1966) je bil vodilni sovjetski raketni inženir, pomemben član ameriško-sovjetskega raketnega tekmovanja in po dosežkih na področju raketne tehnike verjetno povsem enakovreden von Braunu. Leta 1938 je bil pod Stalinom aretiran in obsojen na 10 let zapora. Kot zapornik je med drugo svetovno vojno v veliki tajnosti in anonimnosti pomagal razvijati tako sovjetske bombnike kot sovjetsko raketno tehniko. Leta 1944 je bil izpuščen, a zaradi po-

znavanja vojaških tajnosti še naprej strogo nadzorovan. Rehabilitiran je bil šele leta 1957. Leta 1945 je prejel najvišja sovjetska priznanja za zasluge pri razvoju vojaške tehnike. Istega leta je bil vodilni sovjetski strokovnjak, ki je v Nemčiji prevzel nadzor in raziskave nemških zaplenjenih raket V2. Koroljov ima izjemne zasluge za sovjetski razvoj balističnih raket in za sovjetske vesoljske uspehe.

⁵⁶Victor Weisskopf (1909–2002) je bil avstrijski fizik, ki je tik pred nacistično priključitvijo Avstrije leta 1937 odšel v ZDA. Kot mlad fizik je delal z Bohrom in bil asistent pri Pauliju. Pozneje je bil pomemben sodelavec pri *projektu Manhattan*. V letih 1961–1965 je bil direktor CERN-a. Poleg vrhunskega znanstvenika je bil Weisskopf tudi avtor poljudnih knjig, kot so *Privilege of Being a Physicist* in *The Joy of Insight: Passions of a Physicist*.

⁶³Stanley George Wojcicki, poljsko-ameriški fizik, rojen 1937. Več podatkov kot o vrhunskem profesorju fizike s stanfordske univerze, ki je doktoriral na Berkeleyu leta 1961, je mogoče najti o njegovi ženi Esther Wojcicki, učiteljici in novinarki, ki se ukvarja z izobraževanjem in blogi. Še bolj pa je znana hči Susan Wojcicki, ki je leta 1998 dvema podiplomskima študentoma računalništva (Larry Page in Sergej Brin – ustanovitelja Google) oddala v najem garažo, kjer se je rodil Google. Susan Wojcicki je iz lastnice garaže kmalu postala sodelavka in le deset let pozneje direktorica marketinga korporacije Google z več kot 20 milijard dolarjev letnega prihodka. Druga izmed treh hčera Stanleya Wojcickega, Anne Wojcicki, pa je poročena s Sergejem Brinom. Sergej Mihajlovič Brin je ruskega rodu in se je skupaj s starši (oba sta matematika), ko mu je bilo šest let, preselil v ZDA.

⁷¹CERN – iz francoščine: *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*, je največji laboratorij za fiziko osnovnih delcev na svetu. Domuje na severozahodu Ženeve na švicarsko-francoski meji. CERN danes sestavlja 20 evropskih držav (kljub sodelovanju slovenskih fizikov v CERN-u Slovenija uradno ni članica). Zanimivo je, da je bila med 12 ustanoviteljicami leta 1954 tudi Jugoslavija, ki pa je leta 1961 izstopila. CERN danes zaposluje skoraj 3 000 uslužbencev in v njem dela skoraj 8 000 znanstvenikov, inženirjev in tehnikov z vsega sveta. Letni proračun znaša skoraj milijardo evrov.

⁷²Enrico Fermi (1901–1954), italijanski fizik, najbolj znan po prvem nuklearnem reaktorju. Deloval je na področjih kvantne mehanike, jedrske fizike in fizike osnovnih delcev. Leta 1938 je prejel Nobelovo nagrado za fiziko, star komaj 37 let. Zaradi judovskega porekla žene Laure je takoj po prevzemu Nobelove nagrade v Stockholmu celotna družina emigrirala v ZDA. Pred tem je Fermi delal v Mussolinijevem Rimu, kjer je že pri 24 letih postal profesor fizike na rimski univerzi. V ZDA je postal pomemben sodelavec v projektu *Manhattan*. Fermi spada med največje fizike preteklega stoletja in se je odlikoval tako v teoretični kot tudi v eksperimentalni fiziki. Po njem se imenuje tudi umetni radioaktivni element *fermij* s simbolom *Fm* in atomskim številom 100, ki je bil „ustvarjen“ (z nevtronskim bombardiranjem plutonija) in odkrit šele leta 1952. V ZDA je Fermi delal tudi na chikaški univerzi, kjer se po njem imenuje *Fermilab* v bližini Chicaga. (Glej opombo 61.)

⁷³Richard Phillips Feynman (1918–1988), ameriški fizik, posebej znan v kvantni mehaniki in kvantni elektrodinamiki. Prejemnik Nobelove nagrade za fiziko leta

1965. Bil je eden najbolj znanih fizikov prejšnjega stoletja. Sodeloval je tudi pri razvoju atomske bombe in bil še leta 1986 v skupini ekspertov, ki je raziskovala vzroke nesreče raketoplana *Challenger*. Bil je eden pionirjev ideje kvantnega računalnika in uvajanja nanotehnologije. Feynman je bil tudi uspešen učitelj in popularizator znanosti, saj je znal najtežje koncepte lepo približati povprečnim ljudem. Še posebej so znana njegova predavanja in popularne knjige: *There's Plenty of Room at the Bottom*, *Surely You're Joking, Mr. Feynman!* (avtobiografija), *What Do You Care What Other People Think?*, *Tuva or Bust!* in zanimiv alternativni učbenik *The Feynman Lectures on Physics*. Bil je vsestranski človek in tudi ekscentrik, ki se je zelo uspešno ukvarjal s stvarmi, kot so klovnjaštvo, žongliranje, slikarstvo, glasba (bobni), odpiranje ključavnic ... Njegovo zanimanje za biologijo ga je postavilo ob bok vrhunskim genetikom in mikrobiologom njegovega časa. V ožjem krogu njegovih sodelavcev in prijateljev so mnoga slovita imena, kot na primer Carl Sagan (1934–1996), čigar vrhunski dosežki posegajo na tako različna področja, kot sta kozmologija in literatura.

⁷⁴V Göttingenu je tedaj deloval Heisenberg, ki je bil pred drugo svetovno vojno pomemben fizik, med njo pa vodja nacističnega jedrskega programa. Po izpustitvi iz angleškega ujetništva leta 1946 se je Heisenberg s skupino fizikov „nastanil“ na univerzi v Göttingenu, kjer je postal direktor *Kaiser Wilhelm instituta za fiziko* (sedanji *Inštitut za fiziko Maxa Plancka*). Očitno si je zelo prizadeval za povrnitev ugleda Nemčiji. Zaradi hladne vojne je kancler (predsednik vlade) Zvezne republike Nemčije Konrad Adenauer (1876–1967; v času nacizma dvakrat zaprt kot nasprotnik režima, drugič po poskusu atentata na Hitlerja leta 1944), ki je bil kancler v letih 1949–1963, že sprejel načrte NATO, da nemško vojsko oskrbi z jedrskim orožjem. Proti tej odločitvi je Heisenberg z drugimi nemškimi znanstveniki nastopil v znanem *Göttingenskem manifestu*, ki je skupaj z množičnimi protijedrskimi demonstracijami leta 1958 v Hamburgu in drugih nemških mestih mogoče pomagal ustaviti še eno zaostritev hladne vojne. Heisenberg si je v teh letih zelo prizadeval za povezavo in skupno delo evropskih znanstvenikov in je bil menda med pobudniki, ki so predlagali Ženevo kot primerno lokacijo za skupni evropski fizikalni laboratorij, ki je dobil francosko ime CERN.

⁷⁷Peter Higgs, rojen 1929, britanski teoretski fizik, ki je leta 1964 v okviru svojih teorij napovedal obstoj po njem imenovanega *Higgsovega delca* oziroma Higgsovega mehanizma. Po teoriji Higgsov mehanizem razloži maso osnovnih delcev: leptonov (elektron, mion, nevtrino, ...), kvarkov (ki sestavljajo hadrone: protone, nevtrone, ...) in bozonov (gluoni, fotoni, težki bozoni). Leptoni in kvarki tvorijo skupaj *snovne delce* ali *fermione* (po Fermiju). Higgsov mehanizem „razporeja“ maso vsem delcem v standardnem modelu in Higgsov delec naj bi ustrezal skalar-nemu osnovnemu delcu, ki je „odgovoren za maso snovi“ in ki na primer razloži razliko med brezmasnim fotonom in težkimi bozoni W in Z. Teorija, ki predvideva obstoj Higgsovega delca, je splošno sprejeta med fiziki osnovnih delcev in pomeni ključen del standardnega modela fizike osnovnih delcev. V podobni vlogi kot Higgsov delec so bili bozoni W in Z, ki so jih v standardni teoriji napovedali Glashow, Weinberg in Salam, za kar so leta 1979 prejeli Nobelovo nagrado (Sheldon Lee Gla-

show, ameriški fizik, rojen 1932; Abdus Salam, pakistanski fizik 1926–1996; Steven Weinberg, ameriški fizik, rojen 1933). Teorije takratni pospeševalniki niso zmogli podpreti z eksperimentalnimi rezultati. Pospeševalnik SPS je bilo treba dograditi v trkalnik za protone in antiprotone, da je bilo možno leta 1983 dokazati obstoj bozonov W in Z ter izmeriti njihovo maso. Za ta eksperimentalni dosežek sta bila najbolj zaslužna Carlo Rubbia in Simon van der Meer, za kar sta leta 1984 prejela Nobelovo nagrado. Obstoj Higgsovega delca še ni eksperimentalno potrjen in njegova najdba (t. j. odkritje delcev, v katere Higgsov bozon razpada) je eno največjih pričakovanj od novega trkalnika LHC. Higgsov delec je tudi „edini delec“ standardnega modela, ki ga fiziki še niso „videli“.

⁸⁵Georges Charpak (1924–2010), poljsko-francoski fizik judovskega porekla. Leta 1931 se je njegova družina iz Poljske (Dubrovytsia, današnja Ukrajina) preselila v Pariz. Georges Charpak je bil kot član francoskega odporniškega gibanja leta 1943 aretiran in leto zatem deportiran v Dachau, ki ga je verjetno preživel le zato, ker nacisti niso odkrili njegovega judovskega porekla. Po vrnitvi v Pariz leta 1946 je študiral na najelitnejšem oddelku *École Polytechnique* v Parizu, kjer je leta 1948 diplomiral. Leta 1954 je doktoriral pri Frédéricu Joliot-Curieju (Nobelova nagrada 1935 skupaj z ženo Irène Joliot-Curie za odkritje kratkoživih izotopov lahkih elementov – primerjaj opombo 17). Leta 1959 se je Charpak zaposlil pri CERN-u (glej opombo 71). Georges Charpak je leta 1991 zapustil CERN in se upokojil, naslednje leto pa je za svoje dosežke na področju detekcije delcev in še posebej za odkritja *večžičnih proporcionalnih komor* prejel Nobelovo nagrado (glej tudi 2. poglavje v dodatku). Odtlej se je do smrti zavzemal za splošnejše družbene probleme. Tako je bil leta 1995 med pobudniki izobraževalnega projekta *La main à la pâte* (Roka v testu) za popularizacijo in revitalizacijo poučevanja naravoslovnih znanosti in tehnike v francoskih osnovnih šolah. Projekt *La main à la pâte* od leta 1996 podpira francoska *Académie des sciences* in se je od takrat razširil tudi po svetu.

⁸⁹Sir John Bertram Adams (1920–1984), britanski znanstvenik, strokovnjak za pospeševalnike in vrhunski znanstveni menedžer. Njegov oče se je vrnil iz prve svetovne vojne kot vojni invalid, ki je bil potem večinoma nezaposlen; družina z dvema otrokoma je v glavnem živela od socialne pomoči. Z 19 leti je John končal *Technical Institute* (srednja tehnična šola), a njegova družina mu ni mogla zagotoviti univerzitetne izobrazbe. Med drugo svetovno vojno je delal pri razvoju radarja in se pri tem tako odlikoval, da je napredoval med znanstvene sodelavce kljub pomanjkljivi formalni izobrazbi. Takoj po vojni je bil v letih 1945–53 zaposlen v *Atomic Energy Research Establishment* (AERE) v Harwellu, kjer je bil odgovoren za gradnjo sinhrociklotrona z dosegom 175 MeV; ta je bil dograjen leta 1949 kot takrat največji pospeševalnik v Evropi in je delal še nadaljnjih 30 let. Tedanji direktor AERE-ja sir John Cockcroft je Adamsa posebno podpiral in ga leta 1953 poslal s skupino strokovnjakov za pospeševalnike v CERN, kjer je postal vodja gradnje PS-a (PS – *Proton Synchrotron Division*, od leta 2003 *Accelerators & Beams Division*) in leta 1960 – po tragični smrti tedanjega generalnega direktorja CERN-a C. J. Bakkerja za eno leto njegov naslednik. Leta 1961 se je vrnil v Anglijo kot direktor Laboratorija za raziskave o kontroliranem zlitju jeder v Culhamu, kjer je ostal do leta

1967. V naslednjih letih je imel pomembno vlogo v britanski znanstveni hierarhiji in je bistveno prispeval k odločitvi, da se SPS zgradi v okviru CERN-a globoko pod zemljo na mejnem področju med Švico in Francijo, namesto kje drugje v Evropi. To je znižalo predvidene stroške SPS-a skoraj za faktor 2 in omogočilo vse nadaljnje uspehe CERN-a do danes. SPS je bil odobren leta 1971, ko se je Adams vrnil v CERN kot direktor t. i. CERN-a II v letih 1971–75, medtem ko je bil avstrijsko-nemški fizik Willibald Jentschke (1911–2002) direktor CERN-a I (to je „starega“ CERN-a brez SPS-a). SPS je bil dograjen v predvidenem času leta 1976 in je takoj začel delati s predvidenim dosegom 400 GeV. V letih 1976–80 je imel CERN spet dva generalna direktorja. Belgijski fizik in matematik Léon Van Hove je bil odgovoren za program fizikalnih raziskav, Adams pa za vse drugo, predvsem za pospeševalnike. Po letu 1980 Adams ni več sprejemal operativnih nalog. Če bo CERN kdaj postavil spomenik človeku, ki je največ naredil za njegov napredek, bo to najbrž spomenik Johnu B. Adamsu.

⁹⁶Einsteinova teorija relativnosti: Razlikovati moramo med „posebno“ in „splošno“ teorijo relativnosti. Posebna teorija relativnosti izhaja iz dveh Einsteinovih postulatov. Prvič, vsi „inercialni sistemi“, ki se gibljejo v času in prostoru relativno drug na drugega s konstantno hitrostjo, so enakovredni. In drugič, svetlobna hitrost je v vseh inercialnih sistemih enaka. Posebna teorija relativnosti ni spremenila Maxwellovih enačb in je pravilno v skladu z vsemi dotedanjimi in kasnejšimi eksperimenti razširila klasično, to je predkvantno mehaniko na relativne hitrosti, primerljive s hitrostjo svetlobe. Ni pa bila v skladu z Newtonovo teorijo gravitacije. Einstein je potreboval deset let (1905–1915), da je našel splošno teorijo relativnosti, to je klasično teorijo gravitacije, ki je bila v skladu z njegovo posebno teorijo in je hkrati pravilno napovedala rezultate številnih kasnejših eksperimentov, na primer obstoj gravitacijskih valov in črnih lukenj. O posebni teoriji relativnosti se splača prebrati poglavji I–15 in I–16 v Feynmanovih Lectures on Physics (glej opombo 73).

O pospeševalnikih in detektorjih (dodatek k intervjuju s prof. Zupančičem)

1. Energije pospeševalnikov

Energije osnovnih delcev merimo v „elektronvoltih“ (eV): 1 eV je kinetična energija, ki jo prvotno mirujoči elektron pridobi pri preletu potencialne razlike 1V. Tudi mase merimo v enotah eV. Po Einsteinu ima mirujoči delec z maso m tudi mirovno energijo $E_o = mc^2$, kjer je c hitrost svetlobe. (Fiziki, ki se ukvarjajo z osnovnimi delci, pogosto privzamejo, da so enote prostorskih in časovnih razdalj definirane tako, da velja $c = 1$.) Delec, ki se giblje s hitrostjo v , ima polno energijo

$$E = \gamma mc^2, \tag{1}$$

kjer velja

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (2)$$

in

$$\beta = \frac{v}{c}. \quad (3)$$

Njegova kinetična energija je potemtakem $E_{kin} = E - E_o = (\gamma - 1)mc^2$ in lahko se prepričamo, da v nerelativistični limiti $v \ll c$ velja: $E_{kin} = \frac{mv^2}{2}$.

V fiziki osnovnih delcev pogosto potrebujemo mnogokratnike elektronvolta: $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$, $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$, $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ in $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$.

Poleg dosega pospeševalnika, t. j. najvišje energije E delcev, ki jo zmore, je važen tudi *tok delcev* n_p (število delcev, ki se v časovni enoti pretoči skozi presek curka; indeks p pomeni „pospešeni delec“ ali „projektil“). (Produkt $E \cdot n_p$ bi lahko imenovali „moč“ pospeševalnika.) Ljubljanski betatron (glej opombo 21) je pospeševal približno 10^{11} elektronov na sekundo.

Zgodovinski razvoj pospeševalnikov temelji na odkritjih o elektromagnetizmu, ki so se začela v 18. stoletju in ki so pripeljala v 19. stoletju do Maxwellovih enačb, t. j. do dokončne klasične teorije elektromagnetizma. Poleg tega je k razvoju današnjih pospeševalnikov prispeval napredek vakuumske tehnike v 19. stoletju. Do velikih hitrosti lahko pospešujemo z električnimi polji samo nabite delce v evakuiranih ceveh, t. i. žarkovnih ceveh (*beam tubes*). Ob koncu 19. stoletja je ta razvoj pripeljal do prvih praktično uporabnih pospeševalnikov elektronov, s katerimi imamo opravka še danes: rentgenskih aparatov in katodnih (Braunovih) cevi, ki v danes že preživetih televizorjih pričarajo slike na zaslonih. Prvi pospeševalnik pozitivno nabitih delcev (protonov in težjih iononov) sta zgradila Cockroft in Walton leta 1932 (glej opombo 82) in z njim po Rutherfordovih navodilih odkrila prve jedrske reakcije, ki jih povzročajo pospešeni protoni v jedrih.

Danes je gradnja pospeševalnikov in trkalnikov posebna panoga fizike in elektrotehnike, ki ima za sabo več kot stoletni razvoj. Bralcu, ki se želi malo globlje seznaniti s fiziko pospeševalnikov, priporočamo tri poglavja iz knjige *The Feynman Lectures on Physics*, Volume II: II-23 (Votlinski resonatorji), II-24 (Valovni vodniki) in II-29 (Gibanje nabojev v električnih in magnetnih poljih).

2. Detektorji osnovnih delcev

V fiziki osnovnih delcev je detekcija delcev enako pomembna kot njihovo pospeševanje. Skoraj sto let so eksperimentalni fiziki uporabljali fotografske filme ali plošče in zaslone iz snovi, ki so fluorescirale, kadar so jih obsevali delci z dovolj veliko energijo.

Za temi detektorji so prišle *meglične celice* (*cloud chambers*), ki jih je razvil britanski fizik Charles Thomson Rees Wilson (1869–1959, Nobelova nagrada za fiziko 1927). Britanski fizik Cecil Frank Powell (1903–1969, Nobelova nagrada za fiziko

1950) je uvedel uporabo debelih slojev fotografskih emulzij, kjer je bilo treba pod mikroskopom zasledovati sledi osnovnih delcev. Leta 1952 je ameriški fizik Donald Arthur Glaser (rojen 1926, Nobelova nagrada za fiziko 1960) s svojim odkritjem *mehurčnih celic* (*bubble chambers*) izpodrinil uporabo *megličnih celic* (imenovanih tudi *Wilsonove celice*). Zelo velike *mehurčne celice*, polnjene s tekočim vodikom in postavljene v močno magnetno polje, je razvil ameriški fizik Luis Walter Alvarez (1911–1988, Nobelova nagrada za fiziko 1960). V prvi polovici šestdesetih let prejšnjega stoletja so ameriški fiziki Lederman, Schwartz in Steinberger (glej opombe 59, 60, 62) odkrili, da se *mionski nevtrini* razlikujejo od elektronskih tako, da so fotografirali iskre, ki so jih v tako imenovanih *optičnih iskrnih celicah* sprožili mioni. Julija 1973 je CERN-skim fizikom uspelo pomembno odkritje v veliki s freonom poljnjeni *mehurčni celici*, imenovani *Gargamelle*. Komoro so izpostavili snopom mionskih nevtrinov in antinevtrinov, ki jih je produciral CERN-ski PS, in z zelo skrbnimi meritvami dokazali, da velja do tedaj še eksperimentalno nepreverjena elektrošibka teorija Glashowa, Salama in Weinberga (Nobelova nagrada za fiziko 1979 – glej tudi opombo 77), ki je poleg bozonov W^+ in W^- predvidevala tudi nevtralni bozon Z^0 .

Vsem zgoraj omenjenim detektorjem je bilo skupno, da so ustvarjali bolj ali manj natančno upodobitev sledi, ki jo je zapustil osnovni delec pri prehodu skozi plin, tekočino ali trdno telo. To sliko je bilo treba še fotografirati v vsaj dveh projekcijah, razen v posebnih primerih, kot na primer, kadar je bil detektor fotografska emulzija. Fotografije sledov so najprej pregledovale velike skupine priučenih tehnikov, predvsem ženskega spola („scanning girls“). Njihova naloga je bila odkriti in označiti fotografije, na katerih je bilo videti sledove, ki bi fizike utegnile zanimati. Šele nato je lahko fizik sledi skrbno izmeril in po primerni analizi, večinoma s pomočjo računalnika, prišel do zaključkov. Očitno je bilo to delo zamudno in ni bilo naključje, da je Nobelov komite pri utemeljitvi Alvarezove nagrade posebej omenil organizacijo take analize. Konec sedemdesetih let prejšnjega stoletja so *mehurčne celice* začele izumirati. Dokončno „osmrtnico“ jim je leta 2004 v CERN-ovem *Courierju*¹⁰⁰ napisal nemški fizik in dolgoletni tehnični direktor CERN-a Horst Weninger. V članku navaja, da so v vseh mehurčnih celicah po vsem svetu posneli več kot sto milijonov stereoskopskih fotografij (samo v CERN-u več kot polovico). To pa je precej manj od – pri predvideni maksimalni luminoznosti LHC-ja in predvidenem celotnem preseku za sipanje protonov na protonih pri težiščni energiji 14 TeV – danes pričakovanega števila dogodkov v eni sekundi v LHC-ju.

Iz teh besed je očitno, da se je morala v zadnjih štiridesetih letih tehnologija zbiranja in analize podatkov v fiziki osnovnih delcev revolucionarno spremeniti. Sprememba se je začela že med zadnjo svetovno vojno z izumom računskega stroja, ki je deloval še z vakuumskimi elektronkami. Leta 1948 so v Bellovih laboratorijih v ZDA ameriški fiziki John Bardeen (1908–1991), Walter H. Brattain (1902–1987) in William B. Shockley (1910–1989) pri delu s polprevodniki iznašli tranzistor in za to dobili Nobelovo nagrado za fiziko leta 1956. Ob koncu petdesetih let prejšnjega stoletja se je ameriški elektroinženir Jack St. Clair Kilby (1923–2005) pri ameri-

¹⁰⁰<http://cerncourier.com/cws/article/cern/29120>, maj 2011

ški družbi Texas Instruments začel ukvarjati z računalniško tehnologijo in iznašel integrirano vezje, kar mu je prineslo Nobelovo nagrado za fiziko leta 2000, družbi Texas Instruments pa je že leta 1964 omogočilo izdelati prvi žepni elektronski kalkulator. Kmalu se je izkazalo, da se je število posameznih elementov integriranega vezja na ploščinsko enoto polprevodniške ploščice podvojilo vsaki dve leti (Moorovo pravilo). S tem se je začelo bliskovito naraščanje računalniške zmogljivosti. Leta 1969 sta kanadsko-ameriški fizik Willard S. Boyle (rojen 1924) in ameriški fizik George E. Smith (rojen 1930), ponovno iz Bellovih laboratorijev, izumila *charge coupled device* — *CCD*, za kar sta leta 2009 prejela Nobelovo nagrado. Iznajdba je omogočila razvoj digitalnih fotokamer. Nobelovo nagrado za fiziko leta 2009 sta si Boyle in Smith delila s kitajsko-britansko-ameriškim elektroinženirjem Charlesom K. Kaojem (rojen 1933), ki je bil nagrajen za svoje ugotovitve o absorpciji svetlobe v različnih prozornih vlaknih in za uvedbo kremenčevih vlaken z zelo majhno absorpcijo. Slednje je omogočilo prenos veliko večjega števila digitalnih informacij na enoto časa, kot je bilo prej možno s telefonskimi kabli. Ta iznajdba je pomembna za prenos informacij na spletu in še posebej za CERN-ski projekt *LHC Computing Grid*.

George Charpak (glej opombo 85) se je od začetka svojega dela v CERN-u zanimal za možnosti elektronskega odčitavanja informacij o prehodu osnovnih delcev skozi materijo. Na dlani je bilo, da so za to najbolj primerne iskrne komore. Charpaku je uspelo z analogno elektroniko določiti mesto, kjer je iskra preskočila v komori. Pri tem pa je naletel na problem: iskrna komora je potrebovala nekaj mikrosekund, da si je opomogla in postala sposobna za detekcijo naslednjega delca. Charpak je seveda v jedrski fiziki spoznal detektorje, ki tega problema nimajo, to so proporcionalni števci in ionizacijske celice. Za elektronsko odčitavanje pa potrebujejo občutljive ojačevalnike, ki so bili v časih pred integriranimi vezji predragi za uporabo pri velikem številu detektorjev. Charpakova zasluga je bila, da je kot prvi spoznal možnosti, ki so jih ponujala integrirana vezja za kontrolirano ojačevanje primarnih ionskih parov v plinih in s tem za digitalno merjenje osnovnih delcev. V letih 1967–68 je s svojo skupino v CERN-u ne le odkril večžične proporcionalne komore, temveč tudi vse pomembnejše načine za lokalizacijo prehoda osnovnih delcev skozi te komore. V naslednjih letih je še veliko mlajših fizikov, predvsem tudi v sodelovanju s Charpakom, prispevalo k današnji široki uporabi večžičnih proporcionalnih komor pri meritvah z osnovnimi delci.

Pomembna metoda detekcije osnovnih delcev temelji tudi na zgoraj omenjenih CCD-jih, ki s svojo rekordno prostorsko in časovno ločljivostjo omogočajo lokalizacijo kratkoživih delcev in njihovih razpadnih produktov v neposredni bližini trka, v katerem so nastali.

3. AGS

AGS (*Alternating Gradient Synchrotron*) – pospeševalnik na BNL (*Brookhaven National Laboratory* blizu kraja Upton v osrednjem delu otoka Long Island v zvezni državi New York v ZDA) je bil s takratnimi 33 GeV dolga leta pospeševalnik pro-

tonov z največjim dosegom na svetu. Svojo polno moč je prvič dosegel poleti leta 1960. *Alternating Gradient Synchrotron* bi v slovenščini najbolje opisali kot „sinhrotron z močnim zbiranjem“. Fizikalno razlago tega načina zbiranja, ki je izredno pocenil gradnjo sinhrotronov, bralec lahko najde v prej navedenem Feynmanovem poglavju II–29. V BNL-u so tak način pospeševanja leta 1952 iznašli ameriški fiziki Ernest D. Courant (rojen 1920), M. Stanley Livingston in Hartland S. Snyder (1913–1962). Za to iznajdbo bi bili morda dobili Nobelovo nagrado, ko se ne bi izkazalo, da je močno zbiranje že dve leti prej prijavil kot ameriški patent grško-ameriški fizik Nicholas Christofilos (1916–1972), ne da bi ga publiciral v dostopni strokovni literaturi.

Že v šestdesetih letih prejšnjega stoletja je AGS delal v povezavi z 200 MeV linearnim pospeševalnikom (linakom), ki je deloval kot vir protonov. V začetku sedemdesetih let so v BNL-u naredili načrt trkalnika *Isabelle* s superprevodnimi magneti za dva curka s po 200 GeV protonov, ki naj bi ga polnil AGS. Jeseni leta 1978 se je začela gradnja podzemnega tunela za ta trkalnik in naslednje leto so uspešno preizkusili en odklonski magnet. Ko pa so jih naročili več, se je izkazalo, da niso zanesljivi. Gradnja se je zavlekla, nato pa se je pojavila konkurenca: SSC (glej opombo 65 in 5. poglavje tega dodatka). Seveda je ta zmagal in leta 1983 so gradnjo trkalnika *Isabelle* dokončno ustavili, potem ko je bilo porabljenih že okrog 200 milijonov dolarjev. Ta denar pa ni bil izgubljen – v nasprotju z desetkrat večjim izdatkom za SSC. Z nenehnim izboljševanjem tehnologije v BNL-u je AGS ostal v uporabi do današnjih dni in je v prvem desetletju tega stoletja postal vir polariziranih protonov in težkih ionov za trkalnik RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*), ki je v uporabi od leta 2000.

BNL sicer ni več eden od dveh vodilnih svetovnih laboratorijev za fiziko osnovnih delcev, kot je bil skupaj s CERN-om (glej opombo 71) v začetku šestdesetih let prejšnjega stoletja. Dodati pa je treba, da je bil BNL od nekdanj in je še danes aktiven tudi na številnih drugih področjih v naravoslovnih in tehničnih znanostih.

4. Fermilab

Fermilab (*Fermi National Laboratory*) v mestu Batavia blizu Chicaga v zvezni državi Illinois v ZDA (glej tudi opombo 72) je še danes laboratorij z enim največjih za fizikalne raziskave delujočih trkalnikov na svetu *Tevatronom*. Leta 1967 je tedanji ameriški predsednik Johnson podpisal zakon o ustanovitvi laboratorija, ki se je sprva imenoval *National Accelerator Laboratory*. Istega leta je bil ugledni ameriški strokovnjak za področje pospeševalnikov in profesor na Univerzi Cornell Robert R. Wilson (1914–2000) imenovan za njegovega prvega direktorja. Konec leta 1968 se je začela gradnja pri mestecu Batavia. Direktor R. Wilson je upravičil svoj sloves s tem, da je zgradil načrtovani protonski pospeševalnik v predvidenem času za manj denarja, kot ga je bilo prvotno odobrenega, in pri tem uvedel še nekaj koristnih novosti. Konec leta 1972 je pospeševalnik dosegel predvideno energijo 400 GeV, že poldrugo leto kasneje pa so odprli laboratorij in ga hkrati preimenovali v *Fermi National Accelerator Laboratory*, na kratko *Fermilab*. Poleti leta 1977 je

skupina fizikov pod vodstvom Leona Ledermana (glej opombo 60) odkrila delec Y , za katerega je kmalu postalo jasno, da je vezano stanje kvarka b (*bottom* ali *beauty*) in njegovega antikvarka. Jeseni leta 1978 je postal Lederman kot naslednik R. Wilsona drugi direktor Fermilaba (do pomladi 1989). Mesec dni kasneje se je Fermilab odločil, da podvoji energijo protonov s tem, da zgradi pod dotodanjim sinhrotronom za 400 GeV še sinhrotron za 800 GeV s superprevodnimi magneti. Prvi sinhrotron bi potem napajal drugega in superprevodni magneti bi zlahka dosegli dvakrat večjo magnetno poljsko jakost kot navadni elektromagnetni.

Ta odločitev, pri kateri je R. Wilson imel glavno vlogo, se je izkazala kot usodna za Fermilab in za CERN. Že leta 1976 je Carlo Rubbia (glej opombo 86) skupaj s svojima ameriškim kolegom Davidom Clineom (rojen 1933) in Petrom McIntyreom (rojen 1947) napisal predlog za trkalnik proton-antiproton, v bistvu takšen, kakršen je bil kasneje zgrajen v CERN-u. Najprej ga je poskusil „prodati“ Fermilabu, kjer je deloval pospeševalnik za 400 GeV, ki je bil približno enakovreden CERN-ovemu SPS-u. Tedanjemu direktorju R. Wilsonu je bil predlog menda v načelu všeč, ni pa zaupal Rubbii, ki je bil takrat na slabem glasu kot nesoliden fizik (za podrobnosti glej v opombi 86 citirano knjigo Garyja Taubesa). Tako se je R. Wilson odločil, naj Fermilab najprej podvoji energijo svojega pospeševalnika. Glavno odgovornost za ta „*Energy Doubler*“, kot so ga prvotno imenovali, je prevzela nekdanja Wilsonova sodelavka z Univerze Cornell Helen T. Edwards (rojena 1937). V rekordnem času petih let in treh mesecev po Wilsonovi odločitvi je bil *Doubler* dograjen in dosežena energija 800 GeV. *Energy Doubler* so kasneje prekrstili v *Tevatron*, ker je skoraj dosegel energijo 1 TeV, predvsem pa, ker so ga po CERN-ovem zgledu do leta 1986 dogradili v trkalnik proton-antiproton, ki danes dela pri težiščni energiji malo manj kot 2 TeV. Na njem sta dva velika detektorja CDF in DØ (*Collider Detector Facility* in *Detector Zero* – vsak približno 5 000 ton) kot dosedanji največji dosežek Fermilaba odkrila najtežji kvark t z mirovno maso približno 170 GeV. Načrtujejo, da bodo Tevatron kot trkalnik ustavili, brž ko bo LHC potrdil obstoj in maso kvarka t . Verjetno pa bo delal še naprej kot navaden pospeševalnik za produkcijo sekundarnih delcev, na primer nevtrinov. Omenjena Helen Edwards je bila v letih 1989–92 namestnica direktorja SSC-ja (glej opombo 65 in 5. poglavje v tem dodatku) in načelnica oddelka za superprevodnike v SSC-ju, torej praktično odgovorna za njegov glavni del. Tik pred propadom SSC-ja se je vrnila v Fermilab. V leta 2006 izdani knjigi *Out of the Shadows: Contributions of 20th Century Women to Physics* ji je posvečen eden od štiridesetih življenjepisov, ki so jih mednarodni avtorji napisali o najpomembnejših matematičarkah, fizičarkah in astronomkah prejšnjega stoletja.

5. Superconducting Super Collider (SSC)

Širša javnost, posebno v Evropi, se komaj še spominja, da je imel CERN-ov LHC starejšega in večjega predhodnika v ZDA, ki pa je „umrl“ še pred začetkom gradnje LHC-ja: *Superconducting Super Collider* (SSC) v Texasu v ZDA. V letih 1982–1983 je HEPAP (*High Energy Physics Advisory Panel*) *Ameriškega fizikalnega združenja*

svetoval, naj se zgradi trkalnik za dva protonska curka s po 20 TeV. Temu nasvetu je bilo v prid tudi dejstvo, da so že spomladi leta 1982 v CERN-u našli bozone W in Z, kar je leta 1984 Evropi prineslo dve Nobelovi nagradi (glej opombe 77, 86 in 87). Američani so se zbal, da bodo dokončno izgubili dotedanjo vodilno vlogo v fiziki osnovnih delcev (glej v opombi 86 citirano knjigo Garyja Taubesa, na primer str. 95–96). Poleti leta 1984 je bila ustanovljena *Osrednja načrtovalna skupina*, po angleško *Central Design Group* (CDG) za ta trkalnik pod vodstvom Mauryja Tignerja. Ta skupina je leta 1986 objavila *Conceptual Design Report* za SSC kot trkalnik z obsegom skoraj 90 km in superprevodnimi magneti, ki naj bi dosegli magnetno polje z jakostjo 6.5 tesle. Stroški za gradnjo SSC-ja naj bi znašali nekaj več kot 8 milijard dolarjev. Januarja 1987 je tedanji predsednik ZDA Ronald Reagan odobril nadaljevanje projekta. Izmed 43 predlaganih lokacij, od katerih jih je 35 izpolnjevalo zahtevane pogoje, je bila novembra 1988, ko je bil predsednik že G. H. W. Bush, izbrana lokacija v Teksasu, v bližini mesteca Taxahachie, kakšnih 20 km južno od teksaške prestolnice Dallas. Januarja 1989 je bil ustanovljen SSC Laboratory pod vodstvom fizika Roya Schwittersa¹⁰¹, dotedanjega vodje največje eksperimentalne skupine CDF (*Collider Detector at Fermilab*) v Fermilabu. V letu in pol je ta laboratorij izdelal načrt za SSC, ki je bil prilagojen lokaciji v Teksasu, in kmalu potem se je začela gradnja. Do poletja 1992 so skopali že velik del predora za bodoči pospeševalnik in porabili zajeten del do tedaj na približno 11 milijard dolarjev naraslega proračuna. Tedaj so se začele resne težave. Fiziki zunaj področja fizike osnovnih delcev so se zbal, da bodo njihova področja utrpela finančne redukcije v korist SSC-ja. Predvsem NASA se je bala, da bodo zmanjšana sredstva za vesoljske raziskave. Vsem nasprotnikom je prišlo prav, da se je govorilo o nadaljnjih zvišanjih pri proračunu za SSC. Julija 1993, ko je bil predsednik ZDA že Bill Clinton, je ameriški kongres dokončno ustavil gradnjo SSC-ja. Za mnoge fizike, pospeševalniške strokovnjake in druge uslužbence laboratorija SSC (skupaj jih je bilo okrog 2000), predvsem pa za tiste izmed njih, ki so se že preselili v Teksas, je bil konec SSC-ja precejšnja katastrofa.

6. LHC

Trkalnik LHC evropskega laboratorija CERN (glej opombo 71) na švicarsko-francoski meji pospešuje protone (do energije $E = 7\text{TeV}$) v dveh curkih, ki krožita v nasprotnih smereh. Pri trkih protona iz enega curka s protonom iz drugega je celotna energija v njunem težiščnem inercialnem sistemu $2E$.

Priporočamo ogled dokumenta *CERN fax LHC the Guide* na naslovu (maj 2011): <http://public.web.cern.ch/public/en/LHc/Facts-en.html>

V tem dokumentu najdemo veliko zanimivih podatkov, kako LHC deluje in kaj naj bi zmožel, če bo šlo vse po načrtih.

¹⁰¹Roy Schwitters, rojen 1944, ameriški fizik, ki je v devetdesetih letih prejšnjega stoletja delal tudi s skupino slovenskih fizikov pod vodstvom prof. Petra Križana pri *poskusu Hera-B* na DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) v Hamburgu v Nemčiji.

Zakaj so za današnjo fiziko osnovnih delcev trkalniki (namesto navadnih pospeševalnikov) tako zanimivi? Pri hitrostih pospešenega delca blizu svetlobne hitrosti omogočajo trkalniki produkcijo novih, še neznanih delcev z bistveno večjimi mirovnimi masami kot pospeševalniki z enakim dosegom enega samega curka in stacionarno (t. j. v laboratoriju mirujočo) tarčo.

Da bi to lažje razumeli, si lahko namesto trkov med delci predstavljamo trke med avtomobili. Predstavljajmo si avtomobile, ki bi se pri trkih med seboj „stlačili“ in ne odbili (t. j. trki bi morali biti popolnoma neelastični). Dva avtomobila z maso m , ki bi se gibala drug proti drugemu z nasprotnima gibalnima količinama p in $-p$ in trčila čelno, bi po trku na mestu trčenja „pustila skupek“ z maso $2m$ in gibalno količino nič. Njuna kinetična energija pred trkom $E_{kin} = \frac{p^2}{2m} \cdot 2 = \frac{p^2}{m}$ se „porabi za poškodbe“. Kaj pa, če eden od obeh avtomobilov prvotno miruje? Tedaj se v trk „vloži“ kinetična energija $\frac{p^2}{2m}$. Zaradi ohranitve gibalne količine se mora skupek z maso $2m$ po trku še vedno gibati z gibalno količino p , torej s kinetično energijo $\frac{p^2}{4m}$. Za poškodbe ostane le $\frac{p^2}{4m}$, torej štirikrat manj kot pri „trkalniku“ z dvema avtomobiloma (kjer smo vložili dvakrat več energije). Isto velja za dva enaka nerelativistična delca, le da „poškodbe“ lahko pomenijo produkcijo novih delcev. Seveda pa potrebuje resnični trkalnik dva curka, kar je vsaj dvakrat zahtevnejše kot en curek in stacionarna tarča.

Zdaj pa si oglejmo enačbe (1)–(3) v poglavju 1 (ki jih najdemo tudi v zgoraj omenjenih spletnih dokumentih o LHC). Enačbo (1) bi pravzaprav morali nadomestiti z dvema: $M = \gamma \cdot m$ in $E = M \cdot c^2$. Če privzamemo še, da delamo v sistemu enot, kjer velja $c = 1$, dobimo

$$E = M = \gamma \cdot m.$$

To pomeni, da je celotna energija delca E enaka njegovi masi M in obratno. Masa M pa je odvisna od hitrosti delca v in narašča linearno z $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2}}$, t. j. tem bolj, čim bolj se hitrost v bliža vrednosti 1.

Zdaj bi lahko z našim nerelativističnim računom poskusili določiti energijo delca v laboratoriju E_{lab} , ki bi bila potrebna, da bi dosegli pri trku s stacionarnim delcem isto težiščno energijo, kot jo doseže trkalnik z dosegom E , namreč $2E$. Tako bi dobili napačen rezultat. Pravilen je namreč

$$E_{lab} = 2 \frac{E^2}{mc^2} - mc^2. \quad (4)$$

V klasični Newtonovi mehaniki je čas absoluten, prostor pa tridimenzionalen. Einstein je čas in prostor povezal v štiridimenzionalen prostor-čas, v katerem moramo upoštevati Lorentzevo transformacijo, kadarkoli iščemo povezavo med dvema inercialnima sistemoma. Pri tem moramo biti vedno pripravljene na presenetljive pojave, ki nasprotujejo naši „zdravi pameti“. Najbolj znan tak pojav je tako imenovani „paradoks dvojčkov“, t. j. danes eksperimentalno potrjeno dejstvo, da bi se dvojček s potovanja po vesolju vrnil na zemljo malo mlajši kot dvojček, ki je ostal doma. Enačba (4) je še en primer takih presenetljivih dejstev.

Pri dograjenem LHC-ju bo veljalo $E = 7 \text{ TeV}$. Ker je mirovna masa protona $m = 0.938 \text{ GeV} \approx 1 \text{ GeV}$ (oziroma, $m \approx 1 \text{ GeV}/c^2$ brez privzetka $c = 1$), je drugi člen v enačbi (4) zanemarljiv in dobimo $E_{lab} \approx 10^5 \text{ TeV}$. Danes in v dognedni bodočnosti je pospeševalnik s takim dosegom in uporabno močjo mogoč samo v fantastiki. Pač pa se najdejo protoni s takimi energijami v kozmičnih žarkih. Milijarde let že (neškodljivo) letajo skozi vesolje. To je verjetno eden od najprepričljivejših dokazov, da se tudi „črnih lukenj“, ki naj bi jih po strahovih nevednih v LHC-ju ustvarili pospešeni delci, ni bati.

Za razumevanje enačbe (4) svetujemo poglobitev v poglavje II-25 (Elektrodinamika v relativistični notaciji), podpoglavji II-25-1 in II-25-2 omenjene Feynmanove knjige. Tam Feynman razloži, da se razlika med normo (velikostjo) četverice, ki pripada celotni energiji delca, in normo četverice, ki pripada gibalni količini delca, pri Lorentzevi transformaciji ohranja. To pomeni, da je ta razlika neodvisna od inercialnega sistema. En tak sistem je laboratorij z mirujočo tarčo, drugi pa težiščni sistem (dveh delcev, ki trčita). Upoštevanje te invariantnosti vodi do zgornje enačbe.

V prej omenjenih CERN-ovih dokumentih preberemo, da celo zaporedje pospeševalnikov (Linac 2, Booster, PS, SPS) napaja trkalnik LHC s protoni ali težkimi ioni. Pri polnem obratovanju bodo ti pospeševalniki „polnili“ LHC trkalnik slabih 9 minut, nato bo LHC po približno 20 minutah protone pospešil do maksimalnih 7 TeV. Sledilo bo nekaj ur za eksperimente s trki med dvema protonoma pri težiščni energiji 14 TeV. Napajalni pospeševalniki bi bili torej večino časa brez dela. Namesto tega jih bodo lahko v tem času uporabljali za številne eksperimente pri nižjih energijah, na primer s curki nevtrinov (z energijami nekaj sto GeV), ki jih CERN proizvaja in pošilja skozi zemljo v smeri 730 km oddaljenega podzemnega laboratorija *Gran Sasso* v italijanskih Abruzzih, kjer jih čaka več kot 5000 ton težak detektor z imenom OPERA.

Zanimivo je, da LHC ni popoln krog. Približno eno tretjino obsega 27 kilometrov zavzemajo ravni odseki. Ti so potrebni za različne namene. V enem ravnem odseku so nameščeni posebni superprevodni magneti, t. i. „kicker magnets“ („sunkovni magneti“), ki lahko zelo hitro (v največ 0.3 milisekundah) usmerijo curka v dva ravna tunela, ki vodita do „curkovnih smetnjakov“ (*beam dumps*). Drugi ravni odseki so namenjeni za že omenjeno vbrizgavanje curkov iz SPS-a, za magnetne (kvadrupoli, sekstupoli, itd.), ki ne odklanjajo delcev, za dvorane, kjer so nameščeni detektorji za različne eksperimente, za pospeševalne votlinaste elektrode in – presnetljivo pomembno – za „čiščenje“ curkov s t. i. kolimatorji, ki je potrebno zaradi zaželenih trkov med delci iz enega curka z delci iz drugega in zaradi nezaželenih in zelo zapletenih interakcij med curkoma in stenami curkovnih cevi. Brez čiščenja bi bil curek obdan s „sijem“ divergentnih protonov, ki bi prej ali slej končali v superprevodnih magnetih, jih segreli in tako povzročili, da postanejo normalno prevodni. V magnetnem polju vseh superprevodnih magnetov dograjenega LHC-ja pa bo nakopičenih 11 GJ energije, t. j. red velikost več, kot naj bi vsebovala oba curka v dograjenem LHC-ju. Če postane superprevodni magnet normalno prevoden, se ta energija vsaj delno sprosti, t. j. spremeni v toplotno. To očitno vodi do verižne

reakcije in trkalnik morajo nujno ustaviti, da se izognejo resnim poškodbam.

Glede na sorazmerno kratek čas, potreben za polnitev LHC-ja s protoni in za njihovo pospešitev do 7 TeV, se ne bo splačalo nadaljevati z eksperimenti pri 14 TeV kaj dosti dlje kot 10 ur, saj se zaradi trkov med protoni njihovo število v obeh curkih počasi manjša. Prej ali slej je potrebna nova polnitev. Pred novim zagonom/polnitvijo pa se je treba znebiti obeh oslavljenih curkov. Pri končni energiji protonov $E = 7$ TeV bo celotna energija v enem curku 350 MJ, kar zadošča, da raztopi približno 500 kg bakra. Očitno je treba zagotoviti absorpcijo curkov v dveh curkovnih smetnjakih, ki „sta sestavljena“ iz plasti grafita z različnimi gostotami, seveda v vakuumu. Curkovni smetnjak je prirezan grafitni stožec, obdan z železom in betonom. Curek ga najprej zadene na manjšem mejnem krogu. Če curka ne bi prej „razredčili“, bi pri polni moči zvrtil luknjo do konca stožca. Razredčita ga dva posebna sunkovna magneti v smetnem tunelu pred grafitnim stožcem (kadar govorimo o enem magnetu, to pogosto pomeni skupino magnetov z enako smerjo magnetnega polja). Časovno naraščajoče magnetno polje teh dveh magnetov v smetnem kanalu spremeni ravni curek v prostorsko spiralo okrog prvotne smeri curka s temenom blizu grafitnega stožca. V projekciji pravokotno na smer curka v smetnem kanalu je prostorska spirala ravninska spirala s časovno naraščajočim premerom. Seveda morajo biti vse dimenzije grafitnega stožca usklajene z dimenzijami prostorske spirale.

Otvoritev LHC-ja je bila jeseni 2008. Odprava tehničnih napak, odkritih kmalu po otvoritvi, pa je zakasnila začetno delovanje trkalnika za več kot leto dni. Verjetno so se z otvoritvijo pre naglili, ker so hoteli praznovati odhod dotedanjega generalnega direktorja Roberta Aymara (rojen 1936) in prihod novega Rolfa Heuerja (rojen 1948). Na srečanju v Chamonixu v začetku leta 2010 je eden od CERN-ovih direktorjev Stephen Myers (rojen 1946) poročal o delih, ki so bila opravljena na LHC-ju v več kot letu dni po jeseni 2008. Čas so dobro izkoristili tudi za številne izboljšave, ki niso imele nobene zveze s takratnimi tehničnimi napakami. Kljub temu so sklenili, da bodo z obratovanjem LHC-ja nadaljevali postopno in zelo previdno, dokler ne bodo dosegli polnih zmogljivosti.

Med začetnim poskusnim obratovanjem dela LHC pri polovični težiščni energiji $2E = 7$ TeV (od spomladi 2010), t. j. s polovično energijo protonov $E = 3.5$ TeV, in z maloštevilnimi gručami, tako da celotna energija enega curka ne preseže 1 MJ. S temi energijami naj bi že v letu 2011 začeli povsem redno obratovati za eksperimente.

Po tem izredno dolgotrajnem „zagonu“ bodo LHC spet prevzeli pospeševalniški strokovnjaki, da ga dogradijo do načrtovanega dosega $E = 7$ TeV. Fiziki pa upajo, da bodo za dograditev potrebni čas koristno porabili za analizo dotlej zbranih podatkov in morebiti presenetili svet s kakšnim pomembnim odkritjem že pred delovanjem LHC s polno močjo.

Pogovor z dodatki je uredil Damjan Kobal

OBZORNIK ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

LJUBLJANA, MAREC 2011

Letnik 58, številka 2

ISSN 0473-7466, UDK 51 + 52 + 53

VSEBINA

Članek	Strani
Logistični polinomi (Marko Razpet)	41-50
Intervju	
Pogovor s prof. Črtomirom Zupančičem (Damjan Kobal)	51-84
O pospeševalnikih in detektorjih (Damjan Kobal)	84-VII

CONTENTS

Article	Pages
Logistic Polynomials (Marko Razpet)	41-50
Interview	51-VII

Na naslovnici: Sledi delcev alfa v meglični celici. (Avtor: Andrej Likar)