

KVANTNA FIZIKA I MODERNE TEHNOLOGIJE

Branko Hanžek[#]
Dubravko Horvat^b

[#] Zavod za povijest i filozofiju znanosti HAZU
A. Kovačića 5, Zagreb

i

^b Zavod za fiziku, Fakultet elektrotehnike i računarstva
Sveučilište u Zagrebu, Unska 3, Zagreb

[#]e-mail: bhanzek@hazu.hr

^be-mail: dubravko.horvat@fer.hr



13. lipnja 2023.

KVANTNA
FIZIKA I
MODERNE
TEHNOLO-
GIJE

Branko
Hanžek[#]
Dubravko
Horvat^b

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

Sažetak

Od samog početka XX stoljeća pa sve do prve četvrtine XXI stoljeća kvantna fizika je trajna i dominantna tema fizikalnih istraživanja mikrosvijeta kroz niz teorijskih radova, preko fundamentalnih eksperimenata do pretakanja u tehnologije koje posebno u XXI stoljeću preuzimaju pridjev *kvantni* i tako pokazuju duboku povezanost fundamentalnih fizikalnih istraživanja s tehnološkom i tehničkom realizacijom naizgled apstraktnih fizikalnih otkrića. Ovdje ćemo prikazati neke od bitnih teorijskih i eksperimentalnih koraka u stvaranju kvantnog okruženja te opisati današnji trenutak statusa “kvantnog” u tehnološkim projektima i dati pregled nekih futurističkih razmišljanja o znanstvenim i tehnološkim promišljanjima budućnosti.



Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imenaKvantna teorija
iz TD - PlanckStern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

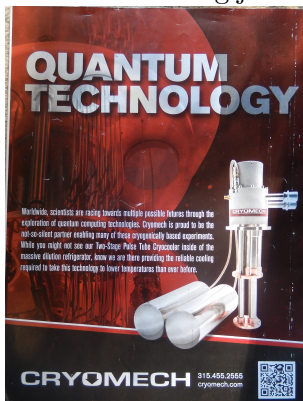
OKSIMORON?

”spoj nespojivog” - (stilistička figura)

(B. Klaić: ”...objedinjenje dva proturječna pojma“)

”hladna toplina”, ”mudra budala”, ”pošteni lopov”

”kvantne tehnologije???”



Fotografija stranice iz časopisa ”Physics World”

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

Želimo pokazati da oksimoron *kvantne tehnologije* prestaje biti oksimoron i prerasta u pravu simbiozu koju možemo prepoznati na nizu primjera, ali i da se “napuštanje oksimorona” moglo prepoznati i ranije.

Pregled izlaganja:

- ▶ (1) Pet velikih teorija fizike! (prof. S.H.);
- ▶ (2) Velika imena povijesti QM;
- ▶ (3) M. Planck i njegova formula iz TD;
- ▶ (4) Stern-Gerlachov eksperiment;
- ▶ (5) Einstein i QM - EPR paradoks;
- ▶ (6) Nobelova nagrada 2022.;
- ▶ (7) Kvantne tehnologije;
- ▶ (8) Budućnost koju vidimo i koju ne vidimo
- ▶

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

Dijeliti fiziku na područja uvijek je osjetljiva stvar ali ovdje se usuđujemo napraviti sljedeću podjelu na ono što volimo zvati **pet velikih teorija fizike**, a to su

- ▶ (1) Klasična mehanika (Newton, Hamilton, Euler, Jacobi, Lagrange,...)
- ▶ (2) Termodinamika i statistička fizika (Carnot, Clausius, Kelvin, Boltzmann, Planck, Gibbs, Helmholtz,...)
- ▶ (3) Elektrodinamika (Coulomb, Faraday, Tesla, Maxwell, Heviside, Lorentz,...)
- ▶ (4) Teorija relativnosti (Poincarè, Mach, Einstein, Lorentz,...)
- ▶ (5) Kvantna mehanika (QM) (Planck, Einstein, Heisenberg, Schrödinger, Bohr, Born, Pauli, Dirac,...).

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

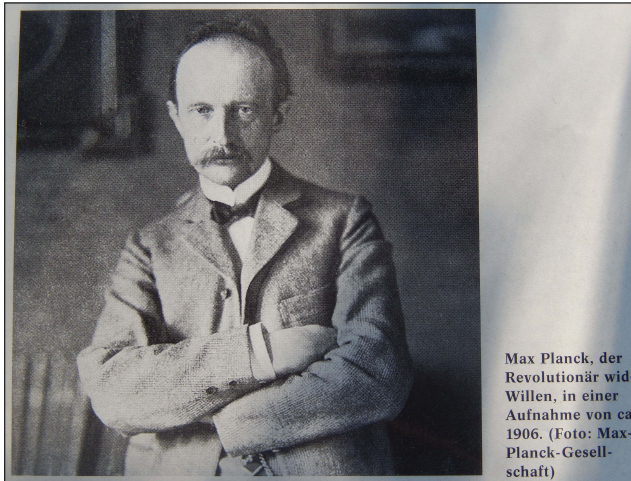
Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj



M. Planck



E. Schrödinger

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj



Niels Bohr im Jahr 1923 anlässlich des 10-jährigen Jubiläums seines Atommo-



Max Born bei Antritt seiner Göttinger Professur im Jahr 1921. Im Wintersemes-
ter 1925/26 hielt Born als Gastprofessor

N. Bohr i M. Born

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj



Werner Heisenberg um 1925. J. C. S. übermittelte seinem Kollegen J. van Vleck folgende Beschreibung: „Heisenberg is a very nice red haired unass young chop, talks a little English, and every body likes him.“ (MPI für Ph

W. Heisenberg



Wolfgang Pauli,
während seines er-
sten Kopenhagener
Aufenthaltes vom
Oktober 1922 bis
zum September
1923. In seiner Pu-
blikation zum Zee-
man-Effekt be-
schränkte Pauli
sich auf die Phä-
nomene und ver-
mied alle Modell-
vorstellungen.
(Pauli-Nachlass,
CERN, Genf).

W. Pauli



P.A.M. Dirac

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

Zanimljivi naslovi i imena

KVANTNA
FIZIKA I
MODERNE
TEHNOLO-
GIJE

Branko
Hanžek^a
Dubravko
Horvat^b

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

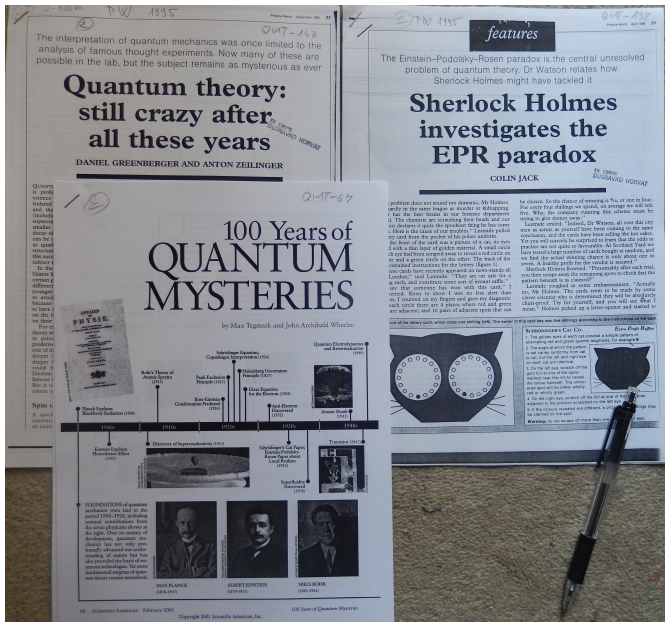
Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

12 / 26

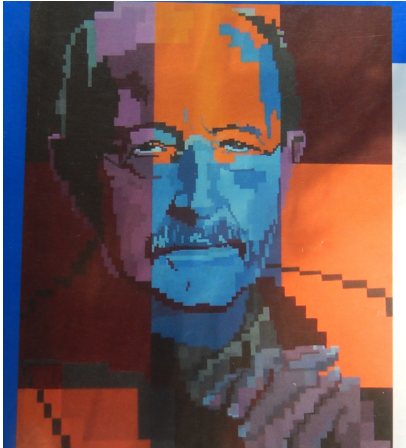


Zgodni naslovi - vidjeti autore!

Planck i klasična termodinamika

KVANTNA
FIZIKA I
MODERNE
TEHNOLO-
GIJE

Branko
Hanžek[#]
Dubravko
Horvat^b



Max Karl Ernst Ludwig Planck u boji

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

Prvi zakon termodinamike: (valja uočiti crtice na "d"-ovima)

$$dU = d'Q - d'W + \mu dN$$

Govorimo o funkcijama stanja ("d" bez crtice i funkcijama procesa "d'" sa crticom). Stvar spašava entropija: $dS = d'Q/T$, i uz $d'W = p dV$ imamo

$$dU = T dS - p dV + \mu dN.$$

Ako je $dN = 0$ (broj čestica se ne mijenja) tada je

$$dS = \frac{1}{T} dU + \frac{p}{T} dV \quad \text{i iz ED} \quad p = \frac{1}{3V} U$$

$$dS = \frac{1}{T} d'Q = \frac{1}{T} \frac{dU}{dT} + \frac{4U}{3V} dV \quad \text{ili}$$

$$\frac{\partial S}{\partial T} = \frac{1}{T} \frac{dU}{dT}, \quad \frac{\partial S}{\partial V} = \frac{4}{3V} U \quad \text{iz čega slijedi}$$

$$\frac{U}{V} = u = bT^4 \quad \text{ili} \quad I = \sigma T^4 \text{ (Stefan-Boltzmannov zakon).}$$

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imenaKvantna teorija
iz TD - PlanckStern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

Iz TD dobijemo i odnos entropije i unutarnje energije iz gornjeg računa

$$\frac{\partial S}{\partial U} = -\frac{A}{U} \quad \text{i uz raniju relaciju}$$
$$\frac{\partial S}{\partial U} = \frac{1}{T} \quad \text{dobijemo} \quad U = Be^{-1/AT}.$$

Ti rezultati vode na spektralnu gustoću zračenja preko

$$\frac{dU}{V dt} = I = \int_0^{\infty} f(\nu, T) d\nu,$$

jer je iz klasične TD i klasične ED

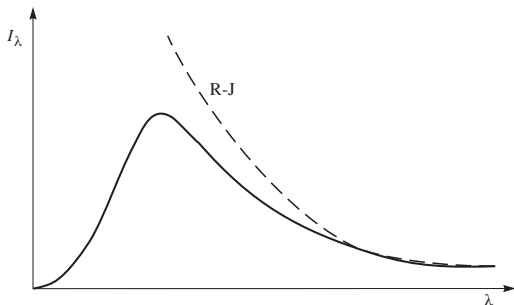
$$f(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U \quad \text{i} \quad f(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT$$

tj. Rayleigh-Jeansov zakon (i UV katastrofu!) iz ekviparticije energije ($\bar{U} = kT$ u TD ravnoteži).

Vrijedi za intenzitet zračenja (S-B zakon)

$$I = \frac{dP}{dS} = \frac{d^2E}{dt dS} \quad \text{i}$$

$$I_\lambda = \frac{dI}{d\lambda} = f(\lambda, T) \quad (\text{spektralna gustoća zračenja})$$



Spektralna gustoća zračenja i Rayleigh-Jeansov zakon
- UV katastrofa (Clausius)

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

Wien je probao ovo

$$f(\lambda, T) = \frac{a}{\lambda^5} e^{-b/kT}.$$

Formula je OK za male valne duljine, ali ne i za velike!
Slično je probao i Paschen. Do te formule dolazi se i preko TD relacije od ranije

$$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = -\frac{A}{U}.$$

Eksperimenti Rubensa, Kurlbauma, Lummera i Pringsheima naveli su Plancka da jednostavno proba nekako “interpolirati” rješenja ovako

$$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = -\frac{A}{U(B+U)} \quad \text{uz, od ranije} \quad \frac{\partial S}{\partial U} = \frac{1}{T}.$$

Te jednadžbe vode na logaritamsku vezu entropije S i unutarnje energije U , što je OK iz statističke fizike.

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imenaKvantna teorija
iz TD - PlanckStern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

Planckova (Boltzmannova) relacija: S - entropija; W - vjerojatnost

$$S = k \ln W$$

No Boltzmann je vjerovao u “atome”, dok Planck nije!
Da bi pomirio dobiveni rezultat i Planck-Boltzmannovu relaciju Planck se priklanja Boltzmannovoj formuli za *kompleksione*, tj. gleda raspored “kuglica” u “kutije” i piše

$$W = \frac{(N - P - 1)!}{N!(P - 1)!}$$

Zatim uzima gornju formulu za entropiju S i dobiva uz Stirlingovu formulu i prvi zakon TD

$$U = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} = \frac{hc}{\lambda} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad \text{ili}$$

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}.$$

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

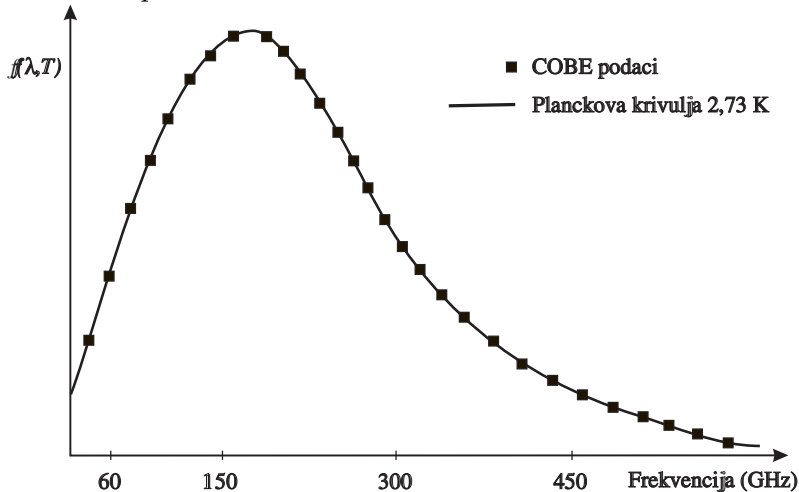
Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

Slika eksperimenata COBE i Planckova formula:



Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

- ▶ de Broglie (dualnost), Compton (raspršenje), ...
- ▶ Rutherford (atom), Bohr (postulati), Einstein (fotoefekt), ...
- ▶ **Stern, Gerlach (eksperiment)**
- ▶ Schrödinger (1926.), Heisenberg (1925.)
- ▶

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

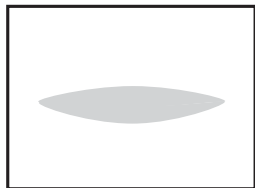
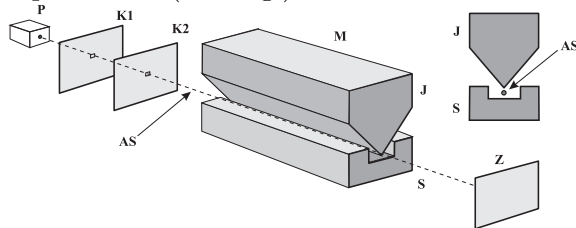
Kraj

Stern-Gerlachov eksperiment

KVANTNA
FIZIKA I
MODERNE
TEHNOLO-
GIJE

Branko
Hanžek[#]
Dubravko
Horvat^b

Slike eksperimenta (1921. g.):



$B = 0$

Z



$B \neq 0$

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

Kvantna mehanika je teorija mikroskopskih pojava i struktura dok nam neposredna slika tehnologije najčešće nameće slike makroskopskih objekata poput kosilica, strojeva za pranje rublja, automobila, aviona i sličnog. Postoji stalna (ponekad i spora) difuzija znanstvenih spoznaja i rezultata u praktičnu primjenu, tj. simbioza znanosti i tehnike - tehnologije.

Gdje prestaje (čista) znanost, a gdje počinje tehnologija?

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

Kvantne tehnologije su područja preklapanja kvantne fizike i tehnologije u kojem se kvantni principi i svojstva, poput superpozicije i spletenosti primijenjuju na tehnološka područja poput računarstva, informacijske tehnologije, komunikacija, umjetne inteligencije, robotike, medicine, farmacije, pa sve do istraživanja svemira.

- ▶ 1 **Kvantno računarstvo;**
- ▶ 2 Kvantna kriptografija;
- ▶ 3 Kvantna simulacija;
- ▶ 4 Kvantna metrologija;
- ▶ 5 Kvantne informacije;
- ▶ 6 Kvantna kontrola.

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

Postulati QM, unitarne transformacije (reverzibilnost), bivalentna logika, kvantne mreže, kvantni algoritmi i QM mjerenje čine osnovu kvantnog računarstva. To je (u ovom trenutku?) najintrigantnije područje kvantnih tehnologija. Gdje smo s konstrukcijom Q računala danas?

- ▶ Deutschov a.
- ▶ Deutsch-Jozsa a.
- ▶ Shoreov a.
- ▶ Q Fourierov transformat
- ▶ Shoreov a.
- ▶ Groverov a.
- ▶ Simonov a.
- ▶ Bernstein - Vazirani a.
- ▶ Teorem o ne-kloniranju
- ▶ Teleportacija
- ▶ ...

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj

D. Mermin (fizika čvrstog stanja, kvantno računarstvo)
postavlja pitanja:

- ▶ Koja su imena glavnih ravojnih grana znanosti?
- ▶ Fundamentalne teorije i principi superpozicije stanja?
- ▶ Da li su osnovni principi kvantne fizike (bili) zamijenjeni?
- ▶ Da li je kvantna mehanika preživjela svo to vrijeme?
- ▶ Da li su istraživači postigli konsenzus o problemima interpretacije?
- ▶ Da li problem prostora i vremena i dalje predstavlja zagonetku?
- ▶ Da li je netko sagradio kvantno računalo koje može faktorizirati 1000 bitni cijeli broj?

Odgovori??

Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj



HVALA!



Sažetak

Uvod

Pregled
izlaganja

Imena - slike

Zanimljivi
naslovi i imena

Kvantna teorija
iz TD - Planck

Stern-
Gerlachov
eksperiment

Q tehnologije

Kvantne
tehnologije

Budućnost

Kraj