



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Modularizace a modernizace studijního programu počáteční přípravy učitele fyziky

Studijní modul

INTEGROVANÝ KURZ FYZIKY

Renata Holubová



Olomouc 2012

Zpracováno v rámci řešení projektu Evropského sociálního fondu
a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky
Modularizace a modernizace studijního programu počáteční přípravy učitele fyziky

Registrační číslo: CZ.1.07/2.2.00/18.0018

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

První vydání
© Renata Holubová, 2012
ISBN 978-80-244-3382-0

OBSAH

Co je věda	5
Proces fyzikálního poznávání	9
Soustava jednotek	12
Chyby měření	17
Fundamentální konstanty	23
Fyzika jako věda	41
Pole	57
Analogie mezi gravitačním a elektrostatickým polem	63
Symetrie a zákony zachování	68
Energie	71
Pohybová rovnice	77
Literatura	87

CO JE TO VĚDA?

Věda řeší základní problém: „Jak vůbec světu rozumíme a jací jsme, že jej můžeme (nějak) poznávat?“

Věda potřebuje

- 1 vědecký jazyk – pojmy, pomocí nichž může poznávat svět a své poznání sdělovat
- 2 hypotézy – předpoklady, ze kterých musí vycházet a které stojí v základu jejich poznávacích schopností
- 3 metody vědecké práce – způsob a pravidla, podle kterých se dobírá poznání

(Kuhn, T.: *The structure of scientific revolution*. University of Chicago Press, 1962)

„Věda je to, co za vědu považují vědci v daném oboru“

(Molnár, Z.: *Úvod do základů vědecké práce*)

Co rozumíme pod pojmem výzkumná práce?

Podle *Chambers English Dictionary* je to

- pečlivé sledování
- zjišťování faktů
- systematické a cílené šetření s cílem zvětšit objem vědomostí

Výzkumník provádí výzkumnou činnost, používá určitou metodu, je schopen zjistit výsledky a zajistit jejich relevanci k dané metodě, je schopen formulovat závěry, tzn. interpretovat dosažené výsledky.

Výzkumná práce stejně jako učení je dynamický proces, vychází z předchozího výzkumu a znalostí, kterých bylo dosaženo. Nezanedbatelný je vliv okolí a podmínek, za kterých výzkum probíhá.

Základní pojmy:

Metoda (překlad „*meta hodos*“ = „cesta někam“) – je to způsob, jak dosáhnout nějakého teoretického nebo praktického cíle, jinak řečeno je to způsob, postup, jak pomocí určitých principů dosáhnout pravdivého poznání

Metodika – pracovní postup nebo nauka o metodě vědecké práce

Metodologie – nauka o vědeckých metodách, výklad metod určitého vědního oboru

Technika – konkrétní nástroj vycházející z principů a zásad metody, umožňující získání konkrétních údajů o zkoumaných jevech

(Akademický slovník cizích slov)

Výzkum lze rozdělit na dva druhy – základní (v podstatě „čistá věda“) a aplikovaný (pro využití v praxi)

Kriteria vědeckého výzkumu

„Předmětem výzkumu je poznatelný či identifikovatelný předmět, jenž musí být označován a definován tak, aby byl poznatelným a identifikovatelným rovněž pro ostatní.“

Výzkum – sděluji věci nepoznané, je užitečný pro společnost, potvrzuje nebo vyvrací předpoklady, musí umožnit pokračování.

Eco, Umberto 1977: Jak napsat diplomovou práci, České vydání Votobia 1997: 48–53.

Základní metody vědecké práce

Empirické – vychází z reality, patří sem pozorování, měření, experimentování

Logické – myšlenkové pochody, jako je abstrakce × konkretizace, analýza × syntéza, indukce × dedukce

Metodické postupy při výzkumu:

- spekulativní – testování hypotézy úvahou a argumentací,
- akční – navrhne se a odzkouší řešení problému – zpravidla u aplikovaného výzkumu,
- experimentální – oddělené zkoumání testované a kontrolní skupiny; nutno zajistit srovnatelnost všech faktorů kromě zkoumaného,
- pozorování a srovnávání – obdoba experimentu, ale namísto kontrolní skupiny se srovnávají různé testované skupiny – problém interpretace,
- etnografický – výzkumník je sám členem zkoumané skupiny – problém rozlišení mezi objektivním a subjektivním,
- statistické šetření – pomocí statistického vzorku se zkoumají obecnější jevy – nutno zajistit reprezentativnost vzorku, seznámit respondenty s cílem šetření a popřípadě i s výsledky; zachovat anonymitu,
- dotazníky,
- rozhovory (strukturované, volné),
- případová studie – na detailně zpracovaném příkladě se zkoumají nebo dokládají obecné jevy.

Metody lze v rámci výzkumné práce kombinovat, v praxi se překrývají, ale je vhodné je od sebe odlišovat, přinejmenším vědět, jakou metodu výzkum používá

Zásady výzkumu

Přehlednost, transparence:

- od počátku identifikovat a zaznamenávat všechny prameny (aby bylo možno se vrátit vždy zpět a zkontrolovat),
- odlišovat citace pramenů, interpretace pramenů a vlastní tvrzení,
- poskytnout uživateli informace o všech použitých zdrojích / pramenech.

Objektivita

- nepoužívat data a prameny selektivně; odlišným názorům je třeba věnovat stejnou pozornost jako těm, které jsou našemu příznivé,
- nemanipulovat výběrem a formulací dotazů,
- i nepotvrzená hypotéza je legitimním výstupem výzkumu.

Postup výzkumu

- pilotní studie

<ul style="list-style-type: none">• identifikace problému• definice problému• formulace cílů• studium teorie, přehled literatury• plán výzkumného projektu	<i>příprava výzkumu</i>
<ul style="list-style-type: none">• rešerše literatury<ul style="list-style-type: none">▪ upřesnění výzkumného cílu▪ stanovení hypotézy k ověření• sběr dat• analýza dat• výzkumná zpráva• publikace, prezentace	<i>vlastní výzkum</i>
<ul style="list-style-type: none">• implementace (využití)	

Otazníky před započítím výzkumné práce

CO?

- přesně stanovit, čeho se výzkum má týkat, včetně míry detailu

PROČ?

- pro koho? v čím zájmu?

Při aplikovaném, komerčním výzkumu je zásadní, co chce klient, při individuálním jde zejména o vlastní zájem výzkumníka.

KDE?

- organizační, institucionální zázemí
- nutné cesty – kdo ponese náklady?

KDY?

- kolik času je potřeba
- v kterém období je možno výzkum provést

JAK?

- zvážit objekt výzkumu, dostupnost dat, technické prostředky, osobnost školitele

KDO?

- výzkumník / výzkumný tým, dostupné profese

KOLIK?

- realistický odhad finančních zdrojů, včetně nákladů na vnější experty, data

PROCES FYZIKÁLNÍHO POZNÁVÁNÍ

Lze formulovat čtyři hypotézy o poznávání:

1. Proces poznávání světa je neomezený.
2. Každý kvalitativně nový prostředek vytváří podmínky pro kvantitativní pokrok v procesu poznávání.
3. Relativní přírůstek poznatků o světě je úměrný časovému intervalu, v němž poznávací proces probíhá.
4. Získané fyzikální poznatky o světě člověk cílevědomě využívá pro svou další činnost.

Podrobněji lze říci, že člověk je schopen poznat zejména vše to, co potřebuje poznat. Poznání bude vždy pouze částečné, přibližné (závislé na rozlišovací schopnosti našich smyslových orgánů a přístrojů), relativní (podmíněné jak nedokonalostí smyslových orgánů člověka a použitých přístrojů, tak i dosaženým stupněm vývoje společnosti).

Impulem poznávání může být i kvalitativně nový prostředek (přístroj), zkonstruovaný na základě aplikace dosavadních fyzikálních poznatků, vyvolá kvantitativní pokrok v dalším procesu poznávání.

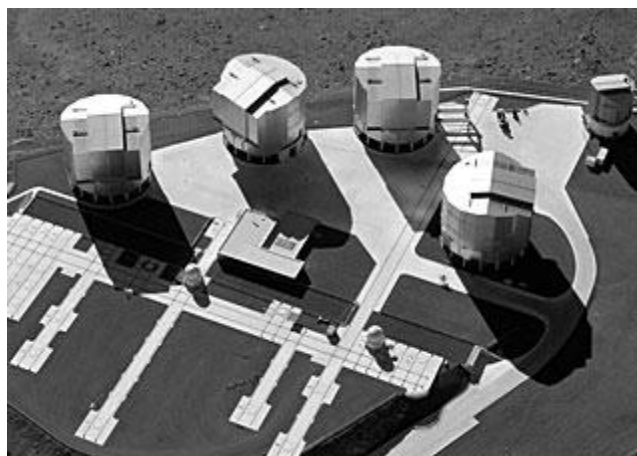
Jako příklad můžeme uvést vývoj dalekohledu, který lze datovat od roku 1609.

Galileo Galilei (1609) používá pro svá pozorování dalekohled, který je tvořen spojným objektivem o velké ohniskové vzdálenosti a rozptylným okulárem s malou ohniskovou vzdáleností. Obrazové ohnisko objektivu tak splývá s obrazovým ohniskem okuláru. Dnes se s tímto dalekohledem setkáme u divadelních kukátek, která zvětšují přibližně 4krát.

Hubbleův kosmický dalekohled (1990). Optická soustava dalekohledu používá systém hyperbolických zrcadel Ritchey-Chretien. Zrcadla jsou vyleštěná s rozlišením 1/65 vlnové délky viditelného světla.

VLT (*Very Large Telescope*)

Chilské Andy (2004), 2 635 m n.m.



Obr. 1 VLT – Andy (<http://www.eso.org/public/czechrepublic/teles-instr/paranal.html>)

Soustava dalekohledů VLT (*Very Large Telescope*) je nejmodernější optický přístroj na světě. Tvoří jej čtyři hlavní dalekohledy s primárním zrcadlem o průměru 8,2 m a čtyři 1,8 m pohyblivé pomocné dalekohledy. Ve VLTI se světlené paprsky kombinují díky složitému systému zrcadel v podzemních tunelech tak, aby délka dráhy světla od každého teleskopu do interferometru byla stejně dlouhá s přesností lepší než 1/1 000 mm na sto metrů. S touto přesností dokáže VLTI rekonstruovat obrazy o úhlovém rozlišení několika milivteřin. Jednotlivé hlavní 8,2 m dalekohledy mohou při hodinové expozici pořídit snímky velmi slabých objektů – až do hvězdné velikosti 30 magnitud. To se rovná pozorování objektů, jejichž světlo je 4miliardkrát slabší, než dokážeme spatřit pouhým okem.

Další z faktorů, který je třeba uvažovat, je časová závislost kvantity poznatků.

Proces poznávání není lineární funkcí času, závisí na dosaženém stupni poznání a vzdělanosti společnosti.

Přírůstek ΔP poznatků o světě je úměrný dosavadní kvantitě P poznatků a časovému intervalu Δt potřebnému k dosažení přírůstku ΔP .

Odtud plyne, že poznatky rostou exponenciálně:

$$P = P_0 \exp(kt).$$

Odhad – za 10 let se kvantita poznatků zdvojnásobí, pak $k = (\ln 2)/10$, a tedy $P = P_0 \cdot 2^{t/10}$.

Za 30 let vzroste kvantita 8krát a za 50 let 32krát.

Stimuly poznávání:

- touha člověka po vědění,
- ekonomické využití poznatků (zisk, pohodlný život, ale i kořistnické cíle – zneužití ve válkách),
- vytváření nástrojů pro snazší poznávání (zpětný efekt výzkumu).

Základní postuláty o fyzikálních jevech

1. Všechny fyzikální jevy mají původ v materiálních objektech – obecný materialistický postulat.
2. Příroda je úsporná ve svých prostředcích a fyzikální jevy vytváří jednotným způsobem – postulat o jednotě fyzikálních jevů.

Materiální objekty

Předmětem studia fyziky je hmota (látka, pole, částice), která je vlastní podstatou světa.

Materiální objekty:

- makrofyzikální (10^{-8} m až 10^{20} m – soustavy molekul až jednotlivá nebeská tělesa,
- megafyzikální (nad 10^{20} m – galaxie, jejich soustavy a ostatní vesmír),
- mikrofyzikální (pod 10^{-8} m – jednotlivé molekuly, atomy, jádra atomů, elementární částice).

Obecný materialistický postulát

Všechny fyzikální jevy mají původ v materiálních objektech.

Z toho plynou 2 požadavky:

- Fyzikální pojmy musí být definovány ve vztahu k materiálním objektům.
- Fyzikální zákony vyjadřují vztahy mezi materiálními objekty.

Postulát o jednotě fyzikálních jevů:

Příroda je úsporná ve svých prostředcích a fyzikální jevy vytváří jednotným způsobem (I. Newton, 1687).

Fyzikální poznávání je členitý, složitý proces, který lze rozložit na několik etap:

- experiment,
- hypotéza (pořadí zde bývá často obrácené),
- fyzikální zákon,
- obecný (fyzikální) princip,
- fyzikální teorie.

Kritérium správnosti fyzikální teorie je fyzikální experiment

Experimenty, které tvoří základní východiska pro utváření fyzikální teorie, nebo ověřují jejich významné teoretické dedukce, se označují jako fundamentální experimenty. Patří k nim jak významné experimenty heuristické, tak některé experimenty verifikační.

SOUSTAVA JEDNOTEK

Základní jednotky mezinárodní soustavy jednotek SI a jejich definice:

Metr je délka trajektorie, kterou proběhne světlo ve vakuu za $(299\,792\,458)^{-1}$ sekundy.

Kilogram je hmotnost mezinárodního prototypu kilogramu uloženého v Mezinárodním úřadě pro váhy a míry v Sèvres.

Sekunda je doba rovnající se 9 192 631 770 periodám záření, které odpovídá přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu atomu cesia 133.

Ampér je stálý elektrický proud, který při průtoku dvěma rovnoběžnými přímými a nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného kruhového průřezu, umístěnými ve vakuu ve vzájemné vzdálenosti 1 metru, vyvolá mezi nimi stálou sílu o velikosti $2 \cdot 10^{-7}$ N na 1 metr délky.

Kelvin je $\frac{1}{273,16}$ část termodynamické teploty trojného bodu vody.

Mol je látkové množství soustavy, která obsahuje právě tolik elementárních jedinců (entit), kolik je atomů v nuklidu uhlíku $^{12}_6\text{C}$ o hmotnosti 0,012 kg.

Kandela je svítivost zdroje, který v daném směru vysílá monofrekvenční záření o kmitočtu $540 \cdot 10^{12}$ Hz a jehož zářivost v tomto směru je 1/683 wattu na steradián.

Praktická realizace jednotek (<http://www.cmi.cz/index.php?lang=1&wdc=312>)

Délka se realizuje pomocí několika doporučených vlnových délek záření laserů (čar atomu vodíku, molekuly jódu a dalších) a lamp (Kr, Hg, Cd).

Hmotnost je dána porovnáním s prototypem z PtIr.

Čas se realizuje pomocí frekvence atomových (cesiových) hodin. Mnoho těchto hodin se mezinárodně podílí na ustanovování časové stupnice TAI (z ní je pro praxi odvozen UTC).

Elektrické veličiny jsou od nedávné doby doporučeny realizovat kvantovými etalony pomocí Josephsonova jevu (elektrické *napětí*) a Hallova jevu (elektrický *odpor*).

Termodynamická *teplota* se realizuje pomocí mezinárodní stupnice ITC-90 (interpolace definovaných teplotních bodů v rozsahu od 0,65 K do nejvyšších teplot měřitelných optickými pyrometry).

Látkové množství se realizuje pomocí poměru hmotností elementárních jedinců vůči atomu $^{12}_6\text{C}$.

Fotometrickými veličinami (jakou je například *svítivost*) se zabývá *la Commission internationale de l'éclairage* (CIE).

Odvozené jednotky – jak vyplývá z názvu, odvozují se ze základních jednotek pomocí definičních vztahů. Např. $[v] = \frac{[s]}{[t]} = \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jednotkou rychlosti je metr za sekundu.

Řada odvozených jednotek má vlastní názvy, většinou podle jmen významných fyziků (joule, newton, hertz, pascal, watt, tesla, weber, ...).

Násobné a dílčí jednotky se tvoří z jednotek SI násobením nebo dělením vhodnou mocninou deseti. Jejich název je pak složený z předpony, která odpovídá násobku jednotky, viz tab. 1, a z názvu příslušné jednotky (pF, nm, μm, mN, kPa, MΩ, GW apod.)

Tabulka 1 Násobné a dílčí jednotky

Faktor	Název	Symbol	Faktor	Název	Symbol
10^{24}	yotta	Y	10^{-1}	deci	d
10^{21}	zetta	Z	10^{-2}	centi	c
10^{18}	exa	E	10^{-3}	mili	m
10^{15}	peta	P	10^{-6}	mikro	μ
10^{12}	tera	T	10^{-9}	nano	n
10^9	giga	G	10^{-12}	piko	p
10^6	mega	M	10^{-15}	femto	f
10^3	kilo	k	10^{-18}	atto	a
10^2	hekto	h	10^{-21}	zepto	z
10^1	deka	da	10^{-24}	yokto	y

Tabulka 2 Odvozené jednotky

Veličina	Symbol	Jednotka	Symbol	Převod
rovinný úhel		radián	rad	
prostorový úhel		steradián	sr	
frekvence	f	hertz	Hz	s^{-1}
rychlost	v		m/s	$m \cdot s^{-1}$
hustota	ρ		kg/m^3	$kg \cdot m^{-3}$
síla	F	newton	N	$kg \cdot m \cdot s^{-2}$
moment síly	M		$N \cdot m$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
hybnost	p		$N \cdot s$	$kg \cdot m \cdot s^{-1}$
tlak	p	pascal	Pa	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
energie (práce, teplo)	$E (W, Q)$	joule	J	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
výkon (zářivý tok)	P	watt	W	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$
světelný tok	Φ	lumen	lm	$cd \cdot sr$
osvětlení	E	lux	lx	$cd \cdot sr \cdot m^{-2}$
jas	L		cd/m^2	$cd \cdot m^{-2}$

optická mohutnost	φ	dioptrie	D	m^{-1}
aktivita radionuklidů	A	becquerel	Bq	s^{-1}
pohlcená dávka	D	gray	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$
náboj	Q	coulomb	C	$A \cdot s$
intenzita el. pole	E		V/m	$kg \cdot m \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
el. potenciál, napětí	φ, U	volt	V	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
el. kapacita	C	farad	F	$kg^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^4 \cdot A^2$
permitivita	ε		F/m	$kg^{-1} \cdot m^{-3} \cdot s^4 \cdot A^2$
el. odpor	R	ohm	Ω	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
el. vodivost	G	siemens	S	$kg^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^3 \cdot A^2$
intenzita mag. pole	H		A/m	$m^{-1} \cdot A$
magnetická indukce	B	tesla	T	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
mag. indukční tok	Φ	weber	Wb	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
indukčnost	L	henry	H	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
permeabilita	μ		H/m	$kg \cdot m \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
katalytická aktivita		katal	kat	$mol \cdot s^{-1}$

V tomto přehledu jsou uvedeny jen některé z odvozených veličin.

Některé jednotky nejsou součástí soustavy SI, ale je povoleno je užívat kvůli jejich praktickému významu. Podle Vyhlášky č. 264/2000 Sb. jsou to jednotky se zvláštními názvy a jednotky, které jsou definovány na základě jednotek SI, ale nejsou dekadickými násobky nebo díly těchto jednotek (Tab. 3), jednotky používané v SI, jejichž hodnoty byly stanoveny experimentálně (Tab. 4) a jednotky povolené pouze ve specializovaných oblastech (Tab. 5).

Tabulka 3

Zvláštní povolené názvy a značky dekadických násobků a dílů jednotek SI			
Veličina	Jednotka	Symbol	Převod
objem	litr	l	1 l = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
hmotnost	tuna	t	1 t = 10 ³ kg
tlak, napětí	bar	bar	1 bar = 10 ⁵ Pa
Jednotky SI, které nejsou dekadickými násobky nebo díly těchto jednotek			
Veličina	Jednotka	Symbol	Převod
čas	minuta	min	1 min = 60 s
čas	hodina	h	1 h = 3 600 s
čas	den	d	1 d = 86 400 s

rovinný úhel	stupeň (úhlový)	°	$1^\circ = \pi/180 \text{ rad}$
rovinný úhel	minuta (úhlová)	'	$1' = \pi/10\,800 \text{ rad}$
rovinný úhel	vteřina (úhlová)	"	$1'' = \pi/648\,000 \text{ rad}$
rovinný úhel	oběh		$1 \text{ oběh} = 2\pi \text{ rad}$
rovinný úhel	grad, gon	gon	$1 \text{ gon} = \pi/200 \text{ rad}$

Jednotky oběh a gon nejsou mezinárodně uznávány.

Experimentálně byly stanoveny jednotky energie a atomové hmotnostní kontanty:

Tabulka 4

Veličina	Jednotka	Symbol	Převod
energie	elektronvolt	eV	$1,602\,176\,462 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
hmotnost	unifikovaná atomová hmotnostní jednotka	u	$1,660\,538\,73 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Astronomická jednotka AU ($1,495\,978\,70 \cdot 10^{11} \text{ m}$), která není ve Vyhlášce č. 264, je mezinárodně uznávána.

Jednotky a názvy jednotek povolené pouze ve specializovaných oblastech:

Tabulka 5

Veličina	Jednotka	Symbol	Převod
optická mohutnost	dioptrie		1 m^{-1}
hmotnost drahých kovů a kamenů	karát		0,0002 kg
plocha půdy a parcel	ar	a	100 m^2
hmotnost textilie na jednotku délky	tex	tex	$10^{-6} \text{ kg m}^{-1}$
tlak krve	milimetr rtuti	mm Hg	133,322 Pa
plocha účinného průřezu	barn	b	10^{-28} m^2

Jednotky ar a barn jsou dočasně mezinárodně uznávány.

Tabulka 6 Jednotky, které nejsou uznávané

Veličina	Jednotka	Symbol	Převod
délka	mikron	μ	10^{-6} m
délka	světelný rok	s. rok, ly	$9,460\,528\,3 \cdot 10^{15} \text{ m}$
plocha	akr	A	$4\,046,86 \text{ m}^2$

hmotnost	metrický cent	q	100 kg
síla	kilopond	kp	9,806 65 N
tlak	atmosféra	atm	101 325 Pa
energie	mezinár. kalorie	cal	4,1868 J
dávka	rad	rad, rd	$10^{-2} \text{ J kg}^{-1}$

Tabulka 7 Historické jednotky

<i>Veličina</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Symbol</i>	<i>Převod</i>
plocha	brázda		přibližně 50 m ²
délka	dlaň		0,07968 m
délka	hon		125,5 m
plocha	jitro staročeské		3150 m ²
plocha	lán selský		186 200 m ²
délka	loket pražský		0,5976 m
délka	míle česká		7530 m
délka	píd'		0,1992 m
délka	provazec rybářský		13,15 m
délka	provazec zemský		25,26 m
délka	prst		0,01992 m
plocha	záhon		přibližně 400 m ²
hmotnost	cent		61,7225 kg
hmotnost	kámen		10,287 kg
hmotnost	libra česká		0,5144 kg
objem	korec starý český		0,09336 m ³
objem	věrtel		0,02334 m ³
počet papíru	složka		10 archů
počet papíru	kniha		100 archů
počet papíru	rys		1000 archů
počet papíru	balík		10 000 archů
počet	vrh		3 kusů
počet	tucet		12 kusů
počet	veletucet		144 kusů
počet	gros velký		1 728 kusů

CHYBY MĚŘENÍ

Fyzikálním měřením zjišťujeme hodnotu fyzikální veličiny. Měřením získáme hodnotu x fyzikální veličiny, která se liší od její skutečné hodnoty označené x_0 . Tuto skutečnou hodnotu neznáme. Určujeme skutečnou chybu ε (absolutní chybu měření) jako rozdíl naměřené hodnoty a hodnoty skutečné:

$$\varepsilon = x - x_0 \quad (1)$$

Skutečná chyba má jednotku stejnou jako je jednotka měřené veličiny. Lze určit relativní chybu měřené veličiny pomocí vztahu (2):

$$\delta = \frac{\varepsilon}{x_0} \cdot 100 \% = \frac{x - x_0}{x_0} \cdot 100 \% \quad (2)$$

Chyba měření může nabývat kladných i záporných hodnot. V praxi lze určit nejpravděpodobnější hodnotu měřené veličiny a její pravděpodobnou chybu.

Dělení chyb

a) Soustavné chyby (systematické) ovlivňují výsledek měření zcela určitým způsobem, s jistou pravidelností. Pokud dokážeme odhadnout příčinu systematické chyby, lze je vyloučit. Původ systematických chyb může být v metodě měření, pozorovateli, přístrojích. Mnohdy lze systematickou chybu odhalit při srovnání měření s jinou laboratoří. Zvětšení počtu měření nemá vliv na velikost systematické chyby.

b) Náhodné chyby ovlivňují hodnotu naměřené veličiny zcela nahodilým způsobem, nelze je předem specifikovat. I když měření opakujeme za jinak stejných podmínek, naměřené hodnoty se navzájem liší. Zdrojem těchto chyb je nedokonalost lidských smyslů, nepřesnosti samotného předmětu zkoumání, náhlé předem neodhadnutelné vlivy přístroje či okolí.

Z hlediska teorie náhodných chyb je proces měření proces statistický s náhodnou proměnnou.

Pravděpodobnou hodnotu měřené fyzikální veličiny a její chyby můžeme určit statistickými metodami. Na rozdíl od systematických chyb vliv náhodných chyb na výsledek měření klesá s rostoucím počtem opakovaných měření.

Teorie náhodných chyb

Typy náhodné proměnné:

a) Diskrétní náhodná proměnná – může nabývat jen určitých číselných hodnot.

b) Spojitá náhodná proměnná – může nabývat libovolných hodnot z určitého (omezeného nebo neomezeného) intervalu.

Náhodné chyby měření, které nabývají libovolných hodnot, považujeme za spojitě náhodné proměnné. Při velkém počtu měření platí, že hodnoty kladné i záporné se vyskytují se stejnou četností a velké hodnoty se vyskytují v malém množství.

Dále budeme určovat pravděpodobnost výskytu náhodné chyby určité velikosti ε . Označme $y(\varepsilon)$ četnost chyby určité velikosti ε . Při opakovaném měření získáme velký počet n chyb,

kteře představují soubor diskřetních hodnot. Zvolme interval $\pm \frac{1}{2} \Delta \varepsilon$ ležící v okolí hodnoty ε . Počet chyb v tomto intervalu je $\Delta \nu$. Potom poměr $\Delta \nu / \Delta \varepsilon$ představuje průměrnou četnost. Četnost $y(\varepsilon)$ je pak dána limitou tohoto podílu, tj.

$$y(\varepsilon) = \lim_{\Delta \varepsilon \rightarrow 0} \frac{\Delta \nu}{\Delta \varepsilon} = \frac{d\nu}{d\varepsilon}. \quad (3)$$

Relativní četnost nezávislá na počtu měření n je dána jako

$$p(\varepsilon) = \frac{y(\varepsilon)}{n} = \frac{1}{n} \frac{d\nu}{d\varepsilon}. \quad (4)$$

Tato veličina není již závislá na počtu provedených měření (počet měření ovšem musí být velký). Násobíme-li relativní četnost $p(\varepsilon)$ šířkou intervalu $d\varepsilon$, dostaneme

$$dP(\varepsilon) = p(\varepsilon)d\varepsilon = \frac{d\nu}{n}, \quad (5)$$

což představuje pravděpodobnost výskytu chyby ε v uvažovaném intervalu $(\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon)$. Dalším vydělením $dP(\varepsilon)$ šířkou $d\varepsilon$, dostaneme

$$\frac{dP(\varepsilon)}{d\varepsilon} = p(\varepsilon). \quad (6)$$

Relativní četnost $p(\varepsilon)$ má tedy význam hustoty pravděpodobnosti, tj. pravděpodobnosti, že chyba ε leží v intervalu jednotkové šířky. Pro určení pravděpodobnosti, že chyba leží v intervalu $\varepsilon \in (-e, e)$ integrujeme výraz v daných mezích

$$P = \int_{-e}^e p(\varepsilon)d\varepsilon \quad (7)$$

Pro určení pravděpodobnosti výskytu náhodné chyby určité velikosti ε je třeba znát funkci $p(\varepsilon)$, tj. zákon rozdělení chyb (Gaussův zákon, Gaussovo rozdělení):

$$p(\varepsilon) = Ce^{-h^2\varepsilon^2} \quad (8)$$

Grafickým znázorněním vztahu (8) je Gaussova křivka (obr. 2).

Symbol h označuje míru přesnosti (větší h – roste četnost malých chyb a tím i počet správnějších výsledků). Měření je přesnější.

Pravděpodobnost toho, aby náhodná chyba ležela v intervalu $(\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon)$ je $p(\varepsilon)d\varepsilon$ – viz obr. 3. Provedeme-li součet těchto součinů pro všechny možné hodnoty ε , tj. budeme-li integrovat v mezích od $-\infty$ do $+\infty$, dostaneme pravděpodobnost, že chyba leží mezi mezními hodnotami $-\infty, +\infty$. Tato pravděpodobnost se ovšem musí rovnat jedné, musí tedy platit tzv. normovací podmínka

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(\varepsilon)d\varepsilon = C \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-h^2\varepsilon^2} d\varepsilon = 1.$$

Řešením tohoto integrálu s nekonečnými mezemi dostaneme vztah

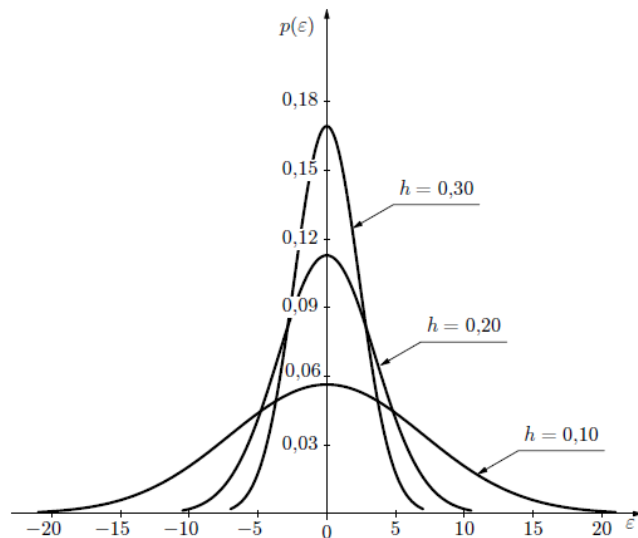
$$C \frac{\sqrt{\pi}}{h} = 1,$$

neboli

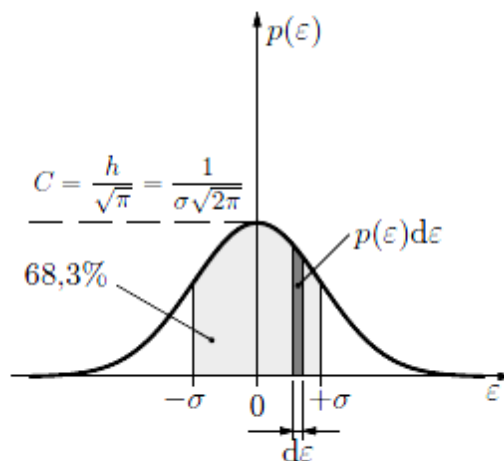
$$C = \frac{h}{\sqrt{\pi}}.$$

Pak Gaussovo rozložení (8) dostává normovaný tvar

$$p(\varepsilon) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 \varepsilon^2}. \quad (10)$$



Obr. 2 Gaussova křivka



Obr. 3 Výpočet směrodatné odchylky

Míru přesnosti h lze uvést do souvislosti se směrodatnou odchylkou σ náhodné chyby (označuje se také střední kvadratická chyba). Pokud bychom počítali střední (průměrnou) náhodnou chybu ε velkého (teoreticky nekonečného) počtu měření, dostali bychom nulu (což je předpoklad Gaussova rozložení).

Při užití směrodatné odchylky σ dostane Gaussovo rozložení ve tvaru

$$p(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}} . \quad (11)$$

Abychom určili význam směrodatné odchylky σ (resp. střední kvadratické chyby), vypočteme, s jakou pravděpodobností se skutečná chyba ε bude nacházet v intervalu $\langle -\sigma, \sigma \rangle$, resp. jak se naměřená hodnota veličiny při jednom měření bude lišit o hodnotu σ od její skutečné hodnoty x_0 . Neboli určíme, s jakou pravděpodobností bude x_0 ležet v intervalu $\langle x_0 - \sigma, x_0 + \sigma \rangle$. Výsledek řešení je $P_\sigma = 0,682\ 69 \dots$, tj. hledaná pravděpodobnost je 68,3 %.

Provedeme-li analogicky výpočet tohoto integrálu v mezích $(-3\sigma, 3\sigma)$, dostaneme výsledek, že pravděpodobnost toho, že měřená veličina x , určená z jednoho měření, bude ležet v intervalu $\langle x_0 - 3\sigma, x_0 + 3\sigma \rangle$ je 99,7 %, tj. prakticky 100 %. Veličina 3σ je tzv. krajní chyba nebo mezní chyba. Znalost krajní chyby pro jedno měření nám umožní provést korigovaný výběr dat měření – z dosud použitých dat v souboru prostě vyloučíme ta data, která překračují mez $\pm 3\sigma$ od aritmetického průměru. Musíme potom provést nový statistický výpočet korigovaného výběru dat.

Z provedených úvah je zřejmé, že určení směrodatné odchylky (resp. střední kvadratické chyby) σ má pro zpracování dat fyzikálních měření zásadní význam.

Hodnocení přesnosti měřené veličiny

Nejpravděpodobnější hodnota měřené veličiny – metoda nejmenších čtverců

Součet všech chyb ε_k je jen přibližně nulový, tedy při vykonání n měření bude platit

$$\sum_{k=1}^n x_k - x_0 \approx 0,$$

odtud

$$x_0 \approx \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k . \quad (12)$$

Lze ukázat, že aritmetický průměr \bar{x} souboru hodnot x_k pro $k \in \{1, n\}$, získaných při n opakovaných měřeních téže veličiny za stejných podmínek, určuje nejpravděpodobnější hodnotu měřené veličiny x_0 .

Neboli

$$S = \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 = \min . \quad (13)$$

Tento výsledek je znám jako metoda nejmenších čtverců.

Soubor n naměřených dat veličiny je však třeba pokládat za náhodný výběr ze souboru všech možných hodnot měřené veličiny, který má Gaussovo rozložení. Pokud bychom totiž provedli n opakovaných měření několikrát za sebou, dostali bychom pro každou z těchto n -tic naměřených hodnot obecně poněkud jinou velikost aritmetického průměru. Proto aritmetický průměr označujeme jako výběrový průměr.

K posouzení přesnosti měření se nejčastěji užívá směrodatná odchylka. My ale neznáme ani správnou hodnotu x_0 , ani neuskutečňujeme nekonečný počet měření. Při náhodném výběru n

dat měření jsme schopni vypočítat aritmetický (tj. výběrový) průměr a odchylky $\Delta_k = x_k - \bar{x}$ jednotlivých naměřených hodnot x_k od tohoto průměru. Můžeme provést součet druhých mocnin těchto odchylek přes všechna k a vypočítat jejich aritmetický průměr; tedy postupovat analogicky jako v případě výpočtu směrodatné odchylky σ pro spojitou proměnnou.

Součet druhých mocnin odchylek Δ_k však nemůžeme dělit počtem n měření, jak by se dalo očekávat, nýbrž $n - 1$. Vyplývá to z teorie chyb a lze to přibližně vysvětlit tím, že jedno číslo z řady n je „odebráno“ na výpočet aritmetického průměru (odebere se jeden „stupeň volnosti“).

Výběrová směrodatná odchylka jednoho měření je

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \Delta_k^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}. \quad (14)$$

Lze dokázat, že s je nejlepším odhadem veličiny σ . Ve starší literatuře se tato veličina proto označuje přímo σ a nazývá se střední kvadratická chyba jednoho měření.

Pro vyhodnocení měření je však důležitější vědět, jakou chybou bude zatížen výběrový průměr naměřených hodnot.

Výběrová směrodatná odchylka aritmetického (výběrového) průměru je

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum \Delta_k^2}{n(n-1)}}. \quad (15)$$

Postup při zpracování dat naměřených hodnot

1. Data píšeme do vhodné tabulky. Vypočteme aritmetický průměr \bar{x} z n naměřených hodnot x_k .
2. Vypočteme odchylky $\Delta_k = x_k - \bar{x}$ pro všechna k , přičemž musí být $\sum \Delta_k = 0$.
3. Vypočteme Δ_k^2 pro všechna k a jejich součet $\sum \Delta_k^2$.
4. Vypočteme výběrovou směrodatnou odchylku aritmetického průměru s_x , abychom vyhodnotili vliv náhodných chyb na výsledek měření (vliv soustavných chyb je nutné korigovat samostatně).
5. Výsledek napíšeme ve tvaru $x = \bar{x} \pm s_{\bar{x}}$ včetně jednotek, přičemž směrodatnou odchylku uvedeme jen na jednu, nejvýše dvě platné cifry (uvádět chybu na více cifer je nejen zbytečné, ale již se považuje za formálně chybný zápis). Počet míst aritmetického průměru \bar{x} zaokrouhlíme tak, aby poslední platná cifra odpovídala poslední platné cifře zaokrouhlené chyby.

Např.

$$d = (18,25 \pm 0,03) \text{ mm};$$

$$m = (250,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-3} \text{ g}; m = (250,48 \pm 0,15) \cdot 10^{-3} \text{ g},$$

$$P = (1200 \pm 10) \text{ W}; P = (1198 \pm 12) \text{ W}.$$

Vliv nepřesnosti měřidla na chybu výsledku

Měřidlo je zhotoveno vždy jen s určitou přesností. Jeho nedokonalost se projevuje v chybě měřidla, která má jednak složku soustavnou, jednak složku náhodnou. Soustavnou chybu měřidla nelze odstranit opakováním měření. Srovnáním s přesnějším měřidlem můžeme zjistit, v jakém rozmezí se tato chyba pohybuje. Pokud není uvedena informace o přesnosti měřidla jeho výrobcem, bereme jeho chybu jako zlomek nejmenšího dílku na stupnici (je to zpravidla polovina nebo celý dílek).

Příklady největších přípustných chyb:

Kovové pravítko 0,5 mm, posuvné měřítko 0,05 až 0,1 mm, mikrometr 0,01 mm, úchylkoměr (indikátorové hodinky) až 0,001 mm, mechanické stopky 0,3 s, digitální stopky 0,01 s, skleněné teploměry 1 až 1/2 dílku, laboratorní váhy (bez korekce na vakuum) 0,1 % až 1 %.

U analogových elektrických měřicích přístrojů se jejich přesnost hodnotí pomocí relativní dovolené mezní chyby p přístroje uvedené v procentech. Podle ní jsou přístroje rozčleněny do 7 tříd přesnosti: 0,1; 0,2 (normály a velmi přesné laboratorní přístroje); 0,5; 1 (laboratorní přístroje); 1,5; 2,5; 5 (přístroje provozní).

Pozn. Relativní chyba veličiny dané součinem a podílem naměřených veličin, je dána druhou odmocninou ze součtu druhých mocnin relativních chyb naměřených veličin, které tvoří součin nebo podíl. Odtud plyne, že veličinu, jejíž exponent $a_i > 1$, je třeba měřit s tolikrát větší relativní přesností, kolikrát je exponent v absolutní hodnotě větší.

FUNDAMENTÁLNÍ KONSTANTY

Fyzikální veličina je pojem, který kvantitativně i kvalitativně popisuje vlastnost hmotného objektu nebo fyzikálního jevu. Každá veličina má *název a značku*. *Měřicí jednotka veličiny* je zvolená veličina určitého druhu, která umožňuje na základě měření kvantitativní porovnávání veličin téhož druhu. *Číselná hodnota veličiny* je poměr veličiny k její zvolené jednotce. Vyjádření veličiny číselnou hodnotou a jednotkou se nazývá *hodnota veličiny*.

Fyzikální konstanta je každá stálá, neměnná veličina určená v dané soustavě jednotek pevnou číselnou hodnotou a příslušnou jednotkou.

Speciálně fyzikálními jsou konstanty označované jako základní a materiálové.

Materiálové konstanty jsou stále pro danou látku a odráží se v nich fyzikální vlastnosti této látky za daného stavu okolí. Mezi tyto konstanty patří například hustota všech látek, velikost měrného elektrického odporu, modul pružnosti v tahu a ve smyku, viskozita, magnetická susceptibilita, relativní permeabilita, index lomu, ...

Základní fyzikální konstanty jsou na vnějších podmínkách nezávislé a mají obecnější použitelnost ve fyzice než konstanty materiálové. Setkáváme se s nimi v rovnicích vyjadřujících velmi obecné fyzikální zákony. Do hlavní skupiny základních fyzikálních konstant patří elementární náboj e , hmotnost elektronu m_e , hmotnost protonu m_p , a Planckova konstanta h , dále konstanty, které vystupují v obecných fyzikálních zákonech (gravitační konstanta G , rychlost světla ve vakuu c), a konstanty molekulové a statistické fyziky (Avogadrova konstanta N_A , Boltzmannova konstanta k).

Hodnoty konstant se určují měřením nebo výpočtem pomocí jiných konstant.

Základní fyzikální konstanty

Rychlost světla ve vakuu c

V 17. století byla centrem vědeckého bádání Itálie a jazykem vědců latina. Snad právě podle počátečního písmene latinského slova *celeritas*, znamenající v češtině rychlost, označujeme malým c konstantu rychlosti světla.

Na počátku 17. století si tehdejší fyzikové a astronomové kladli otázku, zda je rychlost světla konečná. Mezi zastánce opačného názoru, že rychlost světla je nekonečná, patřil René Descartes. Odpůrcem této teorie byl italský vědec a filosof Galileo Galilei, který prosazoval tvrzení, že rychlost světla je velká, ale přesto konečná.

Hypotézu o konečnosti rychlosti světla chtěl Galileo Galilei dokázat a obhájit před vzdělanou společností té doby. Proto roku 1607 navrhl a provedl jako první pokus o změření rychlosti světla. Použil k tomu metodu, která tehdy sloužila k měření rychlosti zvuku. Dva pozorovatelé označení A a B jsou na dvou kopcích asi míli vzdálených a s lucernami opatřenými clonami. Pozorovatel A odstraní clonu z lucerny a světelný paprsek putuje k pozorovateli B. Ve chvíli, kdy pozorovatel B uvidí světlo, odstraní clonu ze své lucerny a tak pošle světelný paprsek zpět.

Světlo má urazit asi 2 míle (zaokrouhleně 3 500 metrů). Tedy při této vzdálenosti je měření časový úsek řádu stotisíciny sekundy, což je z hlediska rychlosti reakce člověka nemožné. Proto tento pokus skončil nezdarem, neboť Galileo v nejlepší případě mohl změřit reakční dobu pozorovatelů. S tehdejší technikou však takto navržený pokus nemohl nijak zpřesnit.

Römerova astronomická metoda

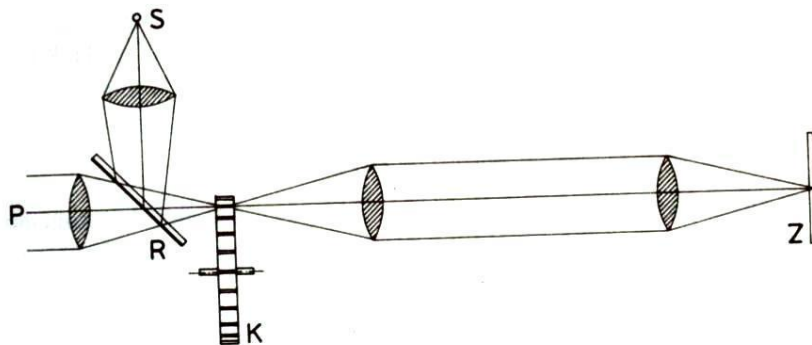
První, kdo opravdu změřil rychlost šíření světla, byl Römer, jenž nevyužil pozemskou metodu jako jeho předchůdce Galileo, ale metodu astronomickou. Stalo se tak roku 1675. Dánský astronom Ole Christensen Römer se zabýval pozorováním Jupiterových měsíců. Zjistil, že intervaly mezi zatměními Jupiterova měsíce Io¹ stínem planety jsou menší, když se Země Jupiteru přibližuje, a zvětšují se, když se Země od Jupiteru vzdaluje. Römer správně předpokládal, že tento jev je způsoben dobou putování světla k Zemi a lze jej vysvětlit za pomoci Dopplerova jevu. Ze znalostí parametrů dráhy a rozměrů Země, Jupitera a Jupiterovy přirozené družice Io, spočítal rychlost šíření světla na 225 000 km/s.

Bradleyho astronomická metoda

Poznatek vyplývající z Römerova objevu, že světlo se šíří konečnou rychlostí, nebyl v 17. a 18. století plně přijat. Descartes a jeho stoupenci stále propagovali myšlenku o nekonečné rychlosti světla. V roce 1727 anglický astronom James Bradley stanovil rychlost šíření světla pomocí metody hvězdné aberace a tak zcela ukončil diskuze o konečné či nekonečné rychlosti šíření světla. Aberace je odklonění světelného paprsku od původního směru vzniklé skládáním rychlosti světla putujícího od hvězdy s rychlostí pohybu Země kolem Slunce. Ze znalosti úhlu aberace a rychlosti Země určil rychlost šíření světla na 301 000 km/s.

Fizeauova pozemská metoda

V roce 1849 francouzský vědec Armand Hippolite Louis Fizeau se pokusil měřit rychlost světla opět pozemskou metodou. Navrhl experiment, jak změřit rychlost světla s větší přesností. Fizeauova metoda byla analogická jednoduché metodě Galileově. Úprava spočívala v odstranění subjektivních prvků z měření. Pozorovatele B nahradil zrcadlem a místo clony ručně ovládané použil otáčející se ozubené kolo. To střídavě světlo propouštělo či zadržovalo podle postupujícího ozubení kola. Schéma Fizeauovy metody, nazývané metoda ozubeného kola, je znázorněno na obr. 4.



Obr. 4 Fizeauova metoda

Světlo jde ze zdroje S a odráží se na slabě postříbřeném zrcadle R, prochází mezi dvěma sousedními zuby ozubeného kola K a dopadá na zrcadlo Z. Od zrcadla Z se odráží a prochází slabě postříbřeným zrcadlem R a dopadá do oka pozorovatele P.

¹ Jeden z Jupiterových měsíců, sopečné těleso pokryté sírou, během neustálých erupcí tryská láva až do výše 200 km, měsíc objevil svým dalekohledem roku 1610 Galileo Galilei.

Předpokládáme, že ozubené kolo se otáčí rychlostí danou n otáčkami za sekundu. Při této rychlosti projde světlo od zdroje S k zrcadlu Z mezerou mezi zuby a zpět od zrcadla Z ke zdroji S mezerou sousední. Doba Δt , za kterou proběhne světlo tam a zpět je

$$\Delta t = \frac{1}{2nz},$$

značí-li z počet zubů kola. Tato doba je ovšem rovna době, za kterou světlo o rychlosti c proběhne celou dráhu L tam i zpět, takže platí:

$$\Delta t = \frac{2L}{c}.$$

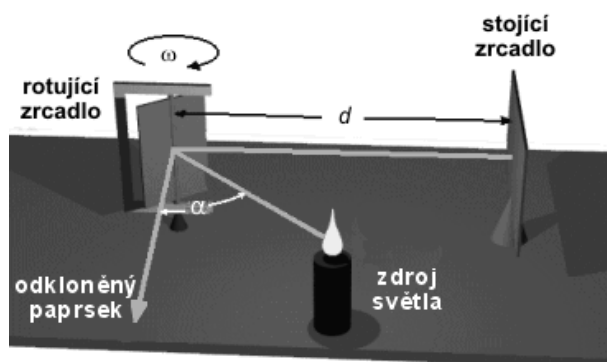
Z rovnic plyne pro rychlost světla:

$$c = 4nzL$$

Fizeau k experimentu využil ozubeného kola se 720 zuby, které se otáčelo rychlostí 12,6 otáček za sekundu a základnu zvolil délky $L = 8,633$ km. Jeho naměřená rychlost světla je tedy přibližně 313 274 km/s.

Tato Fizeauova metoda ozubeného kola byla v průběhu času různě upravována, zdokonalována a zpřesňována. Zpřesnění výsledků přineslo například zvětšení rychlosti rotace kola. Dnes známé hodnotě rychlosti světla se nejvíce s touto metodou přiblížil v roce 1901 Perrotin, který na základně délky 46 km získal ze série měření rychlost šíření světla 299 901 km/s.

Foucaultova pozemská metoda



Obr. 5 Foucaultova metoda (http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_s1.html)

Roku 1838 navrhl Dominique F. J. Arago další pozemskou metodu měření rychlosti světla. Byla to metoda rotujícího zrcátka, kterou realizoval francouzský fyzik Jean Bernard Léon Foucault o dvanáct let později. Metoda spočívala v tom, že světlo letí k otáčejícímu se zrcadlu, kde se odrazí zpět směrem na nepohyblivé zrcadlo a poté znovu na otáčející zrcadlo, které se mezitím pootočí o malý úhel. S touto metodou obdržel Foucault výsledek, který určoval, že rychlost světla je $c = 298\,000$ km/s.

Milchelsonova měření

Metodu rotujícího zrcátka zdokonalil americký fyzik narozený v Polsku, Albert Abraham Michelson. Při své práci plně využil své experimentátorské schopnosti a znalosti optických

jevů. Michelson přišel s myšlenkou, že pro přesnou hodnotu rychlosti světla musí použít dostatečně dlouhé základny. Zvolil takové optické uspořádání, aby při provádění experimentu byl dostatek jasu a klid konečného obrazu i u základen velmi dlouhých, dosahujících i několik desítek kilometrů. Otáčející se zrcátko z Foucaultovy metody nahradil osmibokým skleněným hranolem, jehož stěny byly důkladně vyleštěny a svíraly spolu velmi přesně shodné úhly. Jako i v předcházející metodě je důležité znát dvě veličiny, a to délku základny a čas, za který světlo urazí dvakrát délku základny. Ten úzce souvisí s počtem otáček hranolu. Znal-li Michelson úhlovou rychlost rotujícího hranolu a délku optické dráhy světla, neměl problém rychlost světla vypočítat. Při prvním měření rychlosti světla v letech 1878 až 1879 obdržel výsledek, že se světlo šíří rychlostí 299 910 km/s. Po 42 letech tento pokus opakoval, avšak upravil délku základny. Výrazně ji zvětšil, a to na 35 km, což je vzdálenost mezi horou Mount Wilson a Mount San Antonio v Kalifornii, kde tato měření prováděl. Výslednou hodnotu přepočítal na vakuum. Po těchto měřeních Michelson určil rychlost světla ve vakuu na 299 796 km/s.

V roce 1888 měřil rychlost radiových vln Heinrich Hertz. Byl první, který se pokusil rychlost šíření světla, neboli rychlost šíření elektromagnetických vln, naměřit v jiné části spektra, než v části světelné. Jeho výsledek byl 300 000 km/s.

Ve 20. století prošla renesancí přímá metoda Galileova. Druhý pozorovatel však nestál na sousedním kopci, ale byl jím koutový odrazeč umístěný kosmonauty mise Apollo na Měsíci. Zdrojem světelného paprsku byl laser namířený ze Země.

Jinými moderními metodami pro určení rychlosti světla jsou například metoda Kerrova jevu nebo metoda mikrovlnná, kterou rychlost světla zkoumali fyzikové Essen a Gordon-Smith. Tito vědci měřili vlnové délky mikrovlnného elektromagnetického záření v dutinovém rezonátoru tvaru kruhového válce.

Zpřesňování rychlosti světla končí v roce 1983. Na 17. všeobecném kongresu o mírách a váhách je definována rychlost světla jako 299 792 458 m/s, a to přesně.

Gravitační konstanta G a hmotnost Země M_Z

Gravitace ve vesmíru

Vliv gravitace na planety poprvé pozoroval Tycho de Brahe. Díky jeho pečlivému měření poloh vesmírných objektů zformuloval Johannes Kepler tři zákony nebeské mechaniky. První z nich se týkal drah planet obíhajících kolem Slunce. Zjistil, že se planety pohybují po elipsách, v jejichž ohnisku je Slunce. Druhý zákon nám říká, že planety blíže ke Slunci se pohybují rychleji než ve větších vzdálenostech a ve třetím zákoně formuluje J. Kepler vztah mezi oběžnou dobou planety a poloměrem její dráhy.

Newtonův obecný gravitační zákon

V roce 1687 zformuloval sir Isaac Newton obecný gravitační zákon a zveřejnil ho ve své knize *Matematické principy filosofie přírody* (Philosophiae Naturalis Principia Mathematica). Tento zákon říká, že síla působící na dvě tělesa je přímo úměrná součinu jejich hmotností a nepřímo úměrná kvadrátu jejich vzdáleností, vyjádřeno vzorcem

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}.$$

Konstantu G nazýváme gravitační konstanta, někdy také univerzální gravitační konstanta. Její hodnota je mírou gravitační interakce, která je nejslabší ze všech známých vzájemných působení mezi hmotnými objekty. Gravitační konstanta se také objevuje v Einsteinově obecné teorii relativity.

Zásadní význam má tato konstanta v astronomii. Díky ní můžeme snadno určit hmotnost a hustotu Země, známe-li poloměr Země R , gravitační zrychlení g na povrchu Země a právě onu zmiňovanou konstantu G . Hmotnost Země pak dostaneme pouhým dosazením do vzorce

$$M = \frac{g \cdot R^2}{G},$$

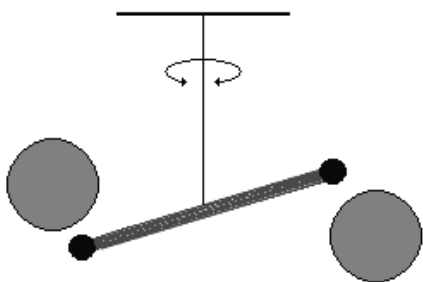
a hustotu Země ze vzorce

$$\rho_{\text{stř}} = \frac{3g}{4\pi R G}.$$

Dále se pomocí konstanty G dá stanovit hmotnost Slunce a ostatních planet.

Cavendisova metoda

První, kdo se pokusil změřit hodnotu gravitační konstanty, byl Henry Cavendish roku 1798. Experiment provedl pomocí torzních vah. Původní návrh pokusu však pochází od Johna Michella, který sám sestrojil měřící zařízení. Bohužel zemřel dříve, než se mu gravitační konstantu podařilo změřit. Po Michellově smrti získal aparaturu Francis John Hyde Wollaston, který ji věnoval Cavendishovi. Henry Cavendish aparaturu mírně upravil, přestavěl a provedl řadu pečlivých experimentů, na základě kterých určil jako první hodnotu gravitační konstanty G .



Obr. 6 Princip pokusu Cavendishe

$$G = 6,75 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{g}^{-2} \cdot \text{m}^2.$$

Cavendish měřil přitažlivou sílu mezi dvěma koulemi pomocí torzních vah. Dvě olověné koule, každá o hmotnosti 730 g, byly upevněny na tyči z jedlového dřeva o délce 180 cm. Tyč byla zavěšena vodorovně na svisle upevněném tenkém dlouhém stříbrném drátku (obr. 6). Do blízkosti malých koulí byly umístěny velké olověné koule, každá o hmotnosti 160 kg. Toto zařízení je schopno torzně kmitat na vlastní frekvenci kolem rovnovážné polohy. Vratnou silou je krouticí moment vlákna. Pomocí malého dalekohledu měřil Cavendish změnu od rovnovážné polohy. Hodnotu gravitační konstanty poté vypočítal z naměřeného úhlu. Obdržel výsledek

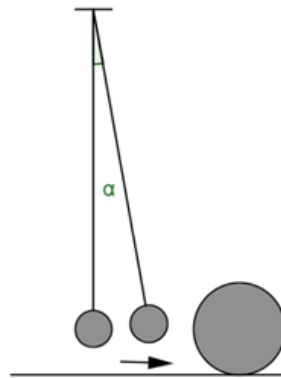
Tvrdí se, že tímto experimentem Cavendish „zvážil Zemi“, neboť po změření gravitační konstanty je možno z tíhy olověné koule určit hmotnost Země. Proto je tento Cavendishův experiment v dějinách známý jako „vážení Země“ a její hmotnost je tedy $5,9 \cdot 10^{24}$ kg. Tyto výpočty však byly během 20. století zpřesněny a v současné době je nejlepší odhad hmotnosti Země asi $5,973 \cdot 10^{24}$ kg, což se od Cavendishova výsledku odlišuje jen asi o 1 %. Z toho vyplývá, že již první pokusy o zjištění hodnoty gravitační konstanty byly vcelku přesné.

Metoda odklonu od svislice

Jiná metoda, jak změřit gravitační konstantu, je založena na měření úhlu mezi svislicí a volně zavěšeným tělesem vychýleným od svislé polohy gravitačním působením dalšího velkého tělesa. Tato metoda se nazývá odklon od svislice. V laboratorních podmínkách je tato metoda nepoužitelná, protože nemáme k dispozici dostatečně hmotné těleso, abychom mohli pozorovat úhel, o který se zavěšené těleso vychýlí.

Metodu použil k měření gravitační konstanty francouzský geofyzik Pierre Bouguer roku 1738. Upravil ji tak, že jako velké těleso použil celou horu. Na úpatí hory Chimborasso v Peru, která stojí osamocena v krajině, naměřil úhel asi 7,5". Tento výsledek byl především významný tím, že ukázal, že Země není homogenní a že povrchové vrstvy mají nižší hustotu.

Roku 1774 vylepšili tuto metodu Angličané Nevil Maskelyne a Charles Hutton. Na stejném poledníku u skotského hřebenu Schiehallion zřídili dvě měřicí stanice. Na závaží použitá v experimentu působila tentokrát síla vyvolaná masivem, a tak na jižním i severním svahu naměřili stejný směr svislice vzhledem ke hvězdám. Odchylna mezi naměřenými úhly byla 15". Oba experimentátoři došli k závěru, že hustota Země je mezi 4 500 až 5 000 kg/m³.



Obr. 7 Metoda odklonu od svislice

(http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d656368616e696b61h&key=233)

Metoda kyvadla

Další zajímavou možností, jak měřit gravitační konstantu je metoda kyvadla. Při ní se využívá toho, že se změnou nadmořské výšky se mění i gravitační zrychlení. Se změnou gravitačního zrychlení také pozorujeme snížení či zvýšení doby kmitu matematického kyvadla za jednotku času. Experimenty jsou tedy názorné ve vysokohorských oblastech či hluboko v podzemí. Proto se tedy provádějí při výstupu na hory nebo při sestupu do dolů nebo různých jiných hlubin Země.

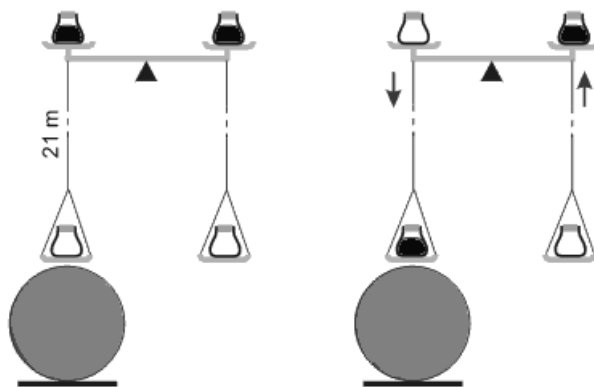
V roce 1824 pozoroval změnu gravitačního zrychlení experimentátor Carlini na hoře Mont Cenis. Vzrůst gravitačního zrychlení směrem do hloubky Země poprvé zjišťoval anglický fyzik a astronom Georgie Biddell Airy v roce 1854, který měřil změnu chodu kyvadlových hodin umístěných v hloubce 383 m v uhelném dole ve Walesu. Hodiny se za 24 hodin předbíhaly o 2 sekundy. Jako nejpravděpodobnější hustotu okolní povrchové vrstvy stanovil hodnotu 2500 kg/m³ a z těchto předpokladů vyvodil hmotnost Země rovnu $M_Z = 7,2 \cdot 10^{24}$ kg a hodnotu gravitační konstanty $G = 5,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Obdobnými měřeními se v Čechách v roce 1883 zabývali výzkumníci Sterneck a Haughton na šachtě sv. Vojtěcha v Příbrami v hloubkách 561 m a 972 m. Ze svých měření určili průměrnou hustotu Země v rozmezí 5 700 až 7 600 kg/m³, hmotnost Země 6,1 · 10²⁴ kg až 8,2 · 10²⁴ kg a hodnotu gravitační konstanty stanovili v rozmezí 4,9 · 10⁻¹¹ m³ · s⁻² · kg⁻¹ až 6,5 · 10⁻¹¹ m³ · s⁻² · kg⁻¹.

Jollyho metody pákových vah

V letech 1879 až 1880 byl německý fyzik z Mannheimu Philips Johann Gustav von Jolly, kdo se jako další zabýval měřením gravitační konstanty. Von Jolly vystudoval matematiku a fyziku na univerzitě v Heidelbergu a od roku 1854 působil na univerzitě v Mnichově. K měření konstanty použil speciální pákové váhy, podle nichž se způsob určování hodnoty konstanty nazývá metoda Jollyho vah.

Von Jolly uskutečnil experiment ve věži univerzitní budovy v Mnichově. Speciální váhy umístil uvnitř věže. Pod každou miskou vah bylo lanko s další miskou vzdálenou 21 m (obr. 8). Experiment měl 2 fáze: V první fázi byly váhy v rovnováze. Na jejich miskách byly postaveny identické baňky, avšak na horních miskách byly baňky s 5 kg rtuti a na spodních miskách stály prázdné baňky. Pod jednou z dolních misek stála olověná koule o průměru 1 m a hmotnosti 5 775 kg. Von Jolly předpokládal, že koule na rtuť 21 metrů vzdálenou v této fázi experimentu téměř gravitačně nepůsobí. V druhé fázi se baňka se rtutí vyměnila s prázdnou baňkou tak, aby na rtuť gravitačně působila olověná koule a z výchylky vahadla sledované pomocí odrazu paprsku od zrcátka na vahadle určil von Jolly hodnotu gravitační konstanty. Tato metoda je však velmi náchylná na změnu teploty a vzdušné proudy. V roce 1891 tento pokus zlepšil a provedl John Henry Poynting. Ten umístil olověnou kouli na otočnou desku a tím usnadnil manipulaci s koulí, která tak mohla být pohodlně přesunuta pod obě dolní misky.



Obr. 8 Jollyho pákové váhy

(http://www.dep.fmph.uniba.sk/~kudracik/meranie/2009_bogar_ondrej.ppt#267,22, Iné váhy)

Rezonanční metoda

Roku 1930 navrhl československý fyzik J. Zahradníček tzv. rezonanční metodu. Váhy mající na miskách velmi hmotná tělesa jsou umístěny v blízkosti prázdných testovacích vah, které jsou upraveny tak, aby měly stejnou frekvenci. Testovací váhy se rezonančně rozkmitají a z amplitudy kmitů je možné určit gravitační konstantu. Zahradníček získal hodnotu

$6,66 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$. Obdobu této metody použili k přesnému měření gravitační konstanty v roce 1972 C. Pontikis a L. Facy z Francie.

Gravitační konstanta dnes

Až do současnosti probíhají různá měření gravitační konstanty. Většina měření využívá některé z předešlých uvedených metod. Mezi nepoužívanější metody však patří různé úpravy a modifikace Cavendishova experimentu. Měření gravitační konstanty je i přes modernizaci přístrojů a nové možnosti stále mimořádně obtížné, neboť tato interakce je velmi slabá v porovnání například s elektromagnetickou interakcí. Gravitační konstanta je proto i dnes určena s nejmenší přesností ze všech fundamentálních konstant, a je tedy zatížena velkou relativní chybou. NIST (*National Institute of Standards and Technology*) udává poslední hodnotu gravitační konstanty z roku 2002, a to $G = (6,6742 \pm 0,0010) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$ a hmotnost Země se odhaduje na $M_Z = 5,9736 \cdot 10^{24} \text{ kg}$.

Elementární náboj e

V kapitole o elektřině a magnetismu se setkáváme s elementárním nábojem, což je nejmenší možný elektrický náboj objektu. Hodnota této konstanty je $e \approx 1,602\,176\,462 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Elementárním nábojem označujeme elektrický náboj elementární částice. Je to fundamentální veličina, která charakterizuje interakci s elektromagnetickým polem. Rozlišujeme dvě formy elementárního náboje, a to kladný a záporný náboj. Zvláštností elementárního náboje je, že náboj všech elementárních částic je až na znaménko přesně stejně velký a je dále nedělitelný. Tedy elementární elektrický náboj e je nejmenší hodnota elektrického náboje, kterou je možno v experimentech pozorovat. Elektrický náboj se může přenášet pouze po celistvých násobcích hodnoty e .

Zásadní postavení elementárního náboje mezi fundamentálními fyzikálními konstantami je dáno tím, že spojuje mnohé makroskopicky měřitelné veličiny s veličinami atomárními. Příkladem toho je, že z měrného náboje elektronu e/m_e lze pomocí e určit jeho hmotnost.

První pokusy změření velikosti elementárního náboje

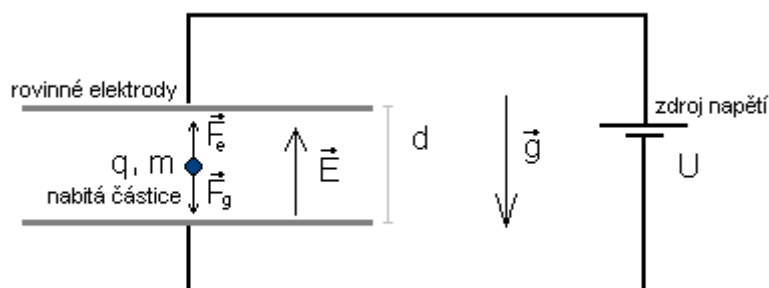
Roku 1897 objevil J. J. Thomson, že katodové paprsky jsou záporně nabitě „korpuskule“, které byly brzy pojmenovány elektrony. Zanedlouho začali mít fyzikové zájem o určení velikosti náboje těchto „korpuskulí“. Řešení problému se ujalo hned několik fyziků. Mezi nimi to byl například anglický fyzik Charles Thomson Rees Wilson, který pozoroval jev spočívající v kondenzaci přesycené vodní páry na nabitých částicích. Za vypracování metody zviditelnění drah elektricky nabitých částic pomocí kondenzovaných par získal v roce 1927 Nobelovu cenu. Mezi další zájemce o změření elementárního náboje patří i fyzik Townsend, který využil Wilsonovu metodu a změřil celkový náboj mlžného obláčku, ve kterém určil počet kapek. Vycházel z předpokladu, že každá kapka vznikla na právě jednom elementárním náboji a vypočítal velikost náboje. Ta mu vyšla řádově 10^{-19} coulombů. Dalšího zdokonalení se dočkala „mlžná“ metoda od J. J. Thomsona a H. A. Wilsona roku 1903.

Millikanova metoda

Největší zásluhu na přesném změření elementárního náboje má Robert Andrew Millikan. Byl to americký fyzik narozený roku 1868 v rodině profesora organické chemie. Millikan studo-

val fyziku na Columbijské univerzitě v New Yorku, kde také získal doktorát. Zabýval se různými fyzikálními problémy z odvětví mechaniky, molekulární fyziky, elektřiny, akustiky a optiky. Hlavní zájem však věnoval přímému určování kvanta záření, studiu Brownova pohybu v plynech a měření elektrického náboje elektronu. Je tvůrcem speciálního kondenzátoru, kterým měřil elektrické náboje malých olejových kapiček, a zjistil, že náboj elektronu je nejmenším kvantem jakéhokoliv elektrického náboje. Právě za práci o elementárním elektrickém náboji získal v roce 1923 Nobelovu cenu.

Se zvětšujícím se zájmem o strukturu atomu se význam elementárního náboje stále zvětšoval a bylo tedy nezbytné, znát i jeho, co nejpřesnější, hodnotu. Tohoto úkolu, přesně změřit velikost elementárního náboje, se ujal roku 1909 výše zmiňovaný fyzik R. A. Millikan. Stejně jako jeho předchůdci použil k měření princip měření nabitých kapek v elektrickém poli. Zanedlouho však v této metodě odhalil spoustu různých chyb, které začal postupně odstraňovat a nedostatky opravovat. Uvědomil si, že vodní kapky se v průběhu měření vypařují a proto místo nich použil kapky hodinářského oleje. V letech 1910 až 1913 se intenzivně věnoval mnoha měřením následujícího experiment (obr. 9).



Obr. 9 Millikanova metoda

Ve vzduchu nad sebou umístil dvě ploché elektrody, mezi něž rozprašil kapičky oleje. Působením ultrafialového světla rozštěpil molekuly vzduchu na elektricky nabitě ionty. Ve chvíli, kdy se na elektrody připojilo vysoké napětí, začaly se ionty působením elektrické síly pohybovat. Pohyb byl pozorovatelný, právě když ionty narazily na kapičky oleje, které bylo možno pozorovat pod mikroskopem. Pro určení elektrického náboje q částičky (olejové kapky) je možné využít situaci, kdy částičky při určité hodnotě levitují, tedy se vznášejí mezi elektrodami. Ve svislém směru působí na kapičky elektrická a tíhová síla, tedy platí

$$F_e = qE \text{ a } F_G = -mg, \quad (16)$$

kde E je složka intenzity elektrického pole ve směru svislém (osa z), m je hmotnost částičky a g je tíhové zrychlení. Stojí-li částička na místě, je splněna podmínky rovnováhy, tj.:

$$F_e + F_G = 0. \quad (17)$$

Pro elektrickou intenzitu mezi dvěma rovinnými elektrodami platí vztah:

$$E = \frac{U}{d}, \quad (18)$$

kde d je jejich vzdálenost a U je napětí, které je na ně připojeno. V případě kapiček oleje mohl Millikan určit jejich hmotnost pomocí známé hustoty oleje a z objemu kapičky. Pro elektrický náboj pak pomocí podmínky rovnováhy dostáváme:

$$q = \frac{dmg}{U}. \quad (19)$$

Podobným postupem Millikan zjistil, že nejmenší náboj, který je možno naměřit, je elementární elektrický náboj a jeho střední hodnotu, až po sérii mnoha experimentů konaných v průběhu zmíněných let, publikoval v roce 1913.

Byla to hodnota $e = (1,591 \pm 0,003) \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Millikanův pokus prokázal existenci elementárního elektrického náboje e a také, že každý jiný náboj musí být celistvým násobkem e . Tento experiment sehrál důležitou roli ve vývoji atomové fyziky a poskytl první spolehlivou hodnotu nejmenšího kvanta elektrického náboje, která pak umožnila odvození dalších atomových konstant.

Jinou metodu pro přímé určení elementárního elektrického náboje, která by byla přesnější, se nepodařilo nalézt. Spolehlivější hodnoty byly získávány pouze nepřímými metodami, kde se e měřilo současně i s jinými základními fyzikálními konstantami, například s konstantou Planckovou.

Birgeovo vyhodnocení výsledků

Záslužnou činnost upřesnění fyzikálních konstant jako jsou právě elementární náboj e , Planckova konstanta h , Avogadrova konstanta N_A a hmotnost elektronu m_e má R. T. Birge, který soustavně shromažďoval a kriticky vyhodnocoval přesná měření různých autorů, kteří určovali základní fyzikální konstanty. Birge je také ten, kdo odhalil malou systematickou chybu v Millikanových měřeních. Viskozita vzduchu, kterou Millikan převzal z měření svých kolegů, byla příliš malá. Po její opravě obdržíme dodnes používanou hodnotu elementárního elektrického náboje $e = 1,603 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Planckova konstanta h

Vyzařování absolutně černého tělesa

Zavedení Planckovy konstanty má dlouhou historii. Roku 1860 zavedl Gustav Robert Kirchhoff pojem *absolutně černého tělesa*, což je těleso, jenž absorbuje všechno dopadající záření a žádné neodráží. Zároveň Kirchhoff prezentoval názor, že intenzita vyzařování absolutně černého tělesa závisí jen na jeho teplotě.

Roku 1878 Joseph Stefan měřením zjistil, že intenzita vyzařování H_e černého tělesa je úměrná čtvrté mocnině jeho termodynamické teploty. O šest let později tuto závislost teoreticky ověřil Ludwig Eduard Boltzmann na podkladu úvah termodynamiky. Výsledkem byl Stefanův-Boltzmannův zákon

$$H_e = \sigma T^4, \quad (20)$$

kde σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta. Hlavní problém však stále byl, jak jsou v záření černého tělesa zastoupeny jednotlivé vlnové délky. V roce 1893 vdedukoval Wien vztah pro spektrální vyzařování H_λ , které závisí na teplotě T a na vlnové délce λ

$$H_\lambda = \frac{1}{\lambda^5} f(\lambda T), \quad (21)$$

ve kterém $f(\lambda T)$ označuje funkci jedné proměnné, již je součin λT . Důsledkem toho vztahu je Stefanův-Boltzmannův zákon a rovnice pro vlnovou délku λ_{\max} , při které H_λ za dané teploty T nabývá maxima, tedy Wienův posunovací zákon:

$$\lambda_{\max} T = \text{konst.} \quad (22)$$

Planckův zákon a Planckova konstanta

Roku 1900 dospěl německý fyzik Max Planck k výrazu pro spektrální vyzařování

$$H_\lambda = \frac{1}{\lambda^5} \frac{2\pi hc^2}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}, \quad (23)$$

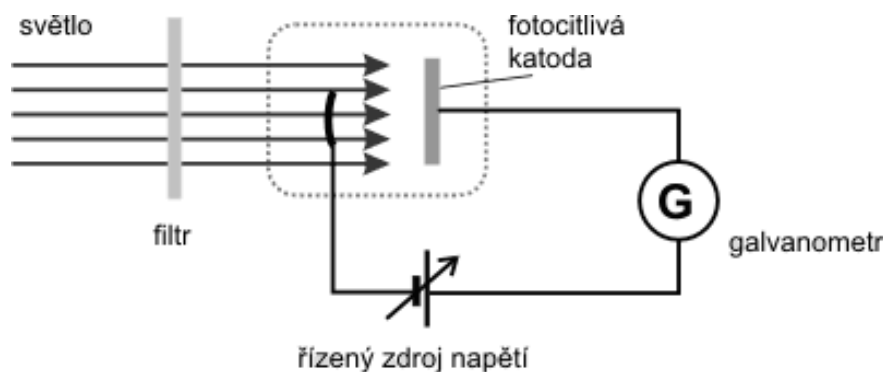
ten dnes nazýváme Planckovým vyzařovacím zákonem a vyhovuje v širokém rozsahu vlnových délek i teplot. Konstanta úměrnosti h dnes nese jméno podle svého objevitele, tj. Planckova konstanta. Její hodnota je $h = 6,62607 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

První změření Planckovy konstanty

Planckova konstanta začala s novými fyzikálními teoriemi nabývat na významu. Snad i proto bylo postupně navrženo mnoho metod, jak určit její hodnotu, a to co nepřesněji. Přibližná hodnota konstanty h byla známa již od jejího zavedení v roce 1901. K jejímu změření, a to s velkou přesností došlo až v roce 1913 až 1916 v experimentu, který byl navržen R. A. Millikanem. Jednalo se o využití fotoelektrického jevu, ve kterém světelná kvanta, fotony, vyráží elektrony z povrchu kovu. Energie fotonu hf se spotřebuje na energii uvolnění elektronu z atomů materiálu W_i a na kinetickou energii elektronu W_k , což je známá Einsteinova rovnice:

$$hf = W_i + W_k. \quad (24)$$

V této nejstarší metodě (viz obr. 10) měření Planckovy konstanty Millikan vyřešil vyčištění povrchu kovových vzorků ve vakuové komoře pomocí rotujícího nože ovládaného elektromagnetem. Světlo, které dopadalo na povrch vzorků, vyráželo elektrony. Jejich kinetickou energii lze zjistit pomocí elektrického potenciálu nutného k jejich zastavení. Při výpočtech použil Millikan hodnotu elektrického náboje, kterou sám experimentálně určil. Pomocí Einsteinovy rovnice získal Planckovu konstantu tehdy s výbornou přesností 0,5 % a hodnotou $h = 6,57 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Tato první navržená metoda měření Planckovy konstanty se dnes využívá i při měřeních ve školních laboratořích.

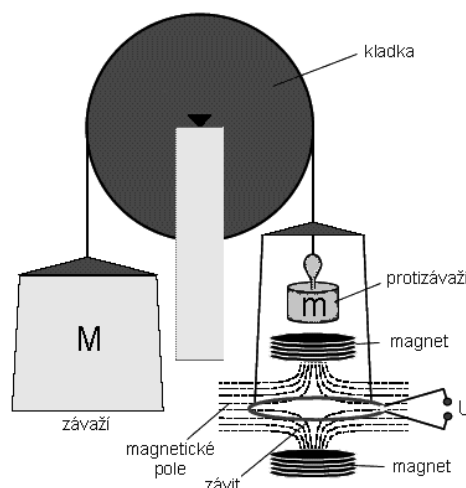


Obr. 10 Měření Planckovy konstanty

Jiné metody

Průběhem času fyzikové vymysleli spoustu jiných metod měření Planckovy konstanty. Za zmínku stojí metoda ionizace atomů rentgenovým zářením, kdy, stručně řečeno, se měří intenzita rentgenového záření určitého prvku v závislosti na napětí rentgenky. Jiný způsob určení hodnoty konstanty nám podává metoda excitačních potenciálů, která navazuje na klasický Franckův a Hertzův experiment. Velmi přesnou metodou je měření krátkovlnné hranice spojitého rentgenového záření či měření Comptonovy vlnové délky elektronu.

V roce 1998 začali měřit Planckovu konstantu odborníci z NIST (*National Institute of Standards and Technology*), jejichž záměrem bylo změřit Planckovu konstantu a připravit tak cestu k nové definici kilogramu, neboť právě kilogram je poslední základní jednotka definovaná pomocí uloženého etalonu. Tento experiment připravil Erwin Williams a David B. Newell. Podstatou experimentu je využití dvou supravodivých magnetů chlazených na teplotu 4 kelviny, které vytvářejí stabilní magnetické pole, v němž se vznáší závit, kterým protéká elektrický proud. Závit je přes kladku spojen se závažím a na straně závitu můžeme přidat protizávaží. (obr. 11)



Obr. 11 Experiment realizovaný v NIST

V první fázi experimentu, kdy nepřidáváme protizávaží, způsobí malá počáteční síla pohyb závitu rychlostí jen 2 m/s, což generuje napětí v závitě $1,018 \pm 0,001$ V. Při druhé fázi experimentu je použito 500 g protizávaží, které je vyváženo proudem v závitě o velikosti 10,18 mA. Odborníci docílili hodnoty Planckovy konstanty:

$$(6,626\ 068\ 91 \pm 0,000\ 000\ 58) \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$$

Proces zdokonalování metody probíhá do současnosti a uvažuje se o tom, že v budoucnosti bude možno touto metodou definovat základní jednotku kilogram.

Avogadrova konstanta N_A

Avogadrova konstanta patří do skupiny základních fyzikálních konstant charakterizujících vlastnosti makroskopických souborů částic, které mají největší význam v molekulové fyzice, termodynamice a statistické fyzice. Mezi tyto konstanty, vedle Avogadrovy konstanty N_A , patří konstanta Boltzmannova k , atomová hmotnostní jednotka m_u , plynová konstanta R a Loschmidtova konstanta L .

Zavedení Avogadrovy konstanty do fyziky spadá do začátku 19. století, do doby, kdy fyzikové opět přistoupili k myšlence, že hmota má atomovou strukturu a není kontinuem. Mezi nej-

známější fyziky té doby se řadí zajisté Amedeo Avogadro a John Dalton, jakožto průkopníci atomismu. Italský fyzik Amedeo Avogadro dospěl roku 1811 pomocí rozboru Daltonových prací a Gay-Lussacova objemového zákona k dnes známému Avogadrovu zákonu. Formule zákona praví: „Stejné objemy různých plynů obsahují za téhož tlaku a teploty stejný počet molekul“. Díky tomuto zákonu byl později zaveden pojem látkového množství, a jehož jednotkou je mol, která dnes patří mezi základní jednotky SI. Definice jednotky mol byla zavedena podle usnesení 14. generální konference pro váhy a míry. S jednotkou mol je úzce spjata Avogadrova konstanta. Mol je látkové množství soustavy, která obsahuje právě tolik elementárních jedinců, kolik je atomů v 0,012 kg uhlíku ^{12}C . Látkové množství jeden mol obsahuje vždy stejný počet molekul, který nazýváme Avogadrova konstanta a má hodnotu $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Určení hodnoty konstanty

Hodnotu Avogadrovy konstanty můžeme určit měřením nebo výpočtem. Pro výpočet nám slouží dva vztahy. První z nich je:

$$N_A = \frac{F}{e}, \quad (25)$$

kde F je Faradayova konstanta a e je elementární náboj. Druhý vztah se používal i u starých měřicích metod a je dán vzorcem:

$$N_A = \frac{R}{k}, \quad (26)$$

kde R je plynová konstanta a k je Boltzmannova konstanta.

Nejstarší známé metody, jak změřit hodnotu Avogadrovy konstanty, jsou založeny na experimentálním studiu Brownova jevu. Tento jev byl stěžejním bodem vědecké činnosti francouzského fyzika Jean Baptiste Perrina. Právě on byl první, kdo navrhl a zrealizoval metody měření Avogadrovy konstanty na bázi Brownova pohybu velmi drobných částíček pryskyřice ve vodě. Obdržel hodnotu $N_A = 6,0 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. Za přínos, který J. B. Perrin svými objevy v oblasti Brownova pohybu uskutečnil, mu byla roku 1926 udělena Nobelova cena.

Určováním Avogadrovy konstanty metodou radioaktivního rozpadu se počátkem dvacátého století zabýval Rutherford, Geiger a Boltwood. Z množství částic α , které se uvolnily při rozpadu, zjistili hodnotu konstanty $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Nejpřesnější metoda experimentálního stanovení Avogadrova konstanty tkví ve využití ohybového jevu rentgenového záření na krystalech, ve kterých uspořádané atomy, ionty nebo molekuly vytvářejí prostorovou krystalickou mřížku. Roku 1972 si pro toto měření Deslattes a Sauder vybrali za experimentální krystal křemík. Z naměřených a vypočítaných hodnot získali $N_A = 6,022\,176 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Molární plynová konstanta R a Boltzmannova konstanta k

Jedna ze základních fyzikálních konstant, molární plynová konstanta R , se objevuje ve stavové rovnici pro ideální plyn, tj. rovnice

$$pV = nRT, \quad (27)$$

kde p je tlak plynu, V je objem plynu, T jeho teplota a n udává látkové množství plynu. Stavová rovnice zahrnuje v sobě tři plynové zákony, děje, a to Boyleův-Mariottův, Gay-Lussacův

a Charlesův. Molární plynovou konstantu R můžeme snadno určit z kteréhokoliv zmíněného děje, známe-li látkové množství plynu n a hodnoty stavových veličin p , V a T . Poslední určená hodnota konstanty je $R = 8,314\,472\text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Boltzmannova konstanta

Boltzmannova konstanta je pojmenována po slavném rakouském fyzikovi Ludwigu Edwardu Boltzmannovi, který se významně podílel na rozvoji statistické fyziky a zabýval se teorií plynů. Právě Boltzmann vyjádřil v teorii plynů základní rozdíl mezi pochody čistě mechanickými a tepelnými. Kolem roku 1877 propracoval teorii mezi entropií a pravděpodobností. V tomto období vstupuje do fyziky konstanta k . Vyskytuje se v rovnici známé pod názvem „Boltzmannův princip“

$$S = k \ln W, \quad (28)$$

kteřá nám říká, že entropie S termodynamické soustavy (vyjadřující míru neuspořádanosti) je úměrná logaritmu termodynamické pravděpodobnosti W stavů. Koeficientem úměrnosti je právě konstanta Boltzmannova k .

Boltzmannova konstanta hraje zásadní roli ve statistické fyzice, kde vyjadřuje vztah mezi teplotou a energií plynu. Její nejnovější určená hodnota je $k = 1,380\,658 \cdot 10^{-23}\text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$.

Molární plynová konstanta R úzce souvisí s Avogardovou a Boltzmannovou konstantou, a to vztahem:

$$R = N_A k. \quad (29)$$

Prvního početního určení se konstanta k dočkala začátkem 20. století. Její hodnotu určil M. Planck s použitím Boltzmannova vztahu. Pro experimentální stanovení Boltzmannovy konstanty je vypracováno mnoho metod, avšak tyto metody jsou analogické s určováním Avogardovy konstanty. Například se jedná o metodu Brownova pohybu, metodu torzních kmitů zrcátka či metody sedimentační. V dnešní době tyto zmíněné metody nepostačují k požadovanému přesnému měření konstanty. Z těchto důvodů se Boltzmannova konstanta nejčastěji určuje výpočtem pomocí vzorce s Avogardovou a plynovou konstantou.

Hmotnostní jednotka m_u

Hmotnostní jednotka neboli unifikovaná atomová hmotnostní konstanta m_u je definována jako 1/12 klidové hmotnosti m_C atomu nuklidu uhlíku $^{12}_6\text{C}$ v základním stavu a bez chemických vazeb. Hodnota konstanty z roku 2002 je $m_u = 1,660\,538\,86 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$.

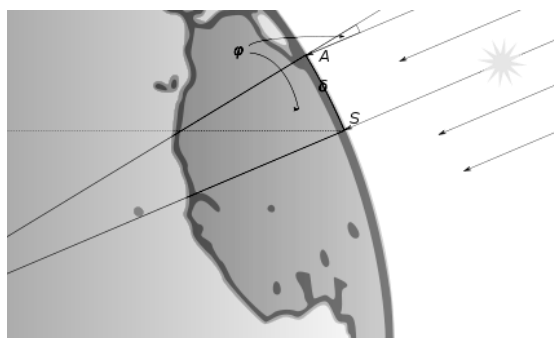
Do roku 1961 používali chemikové a fyzikové odlišné definice této konstanty, a tak se jejich hodnoty lišily. Po tomto uvedeném roce došlo však k dohodě a byla odsouhlasena výše uvedená definice konstanty.

Poloměr Země R_Z a délka rovníku

Již v 6. století př. n. l. tvrdil významný matematik Pythagoras, že Země je kulatá. Tuto myšlenku do světa hlásal i Platón. První důkazy však přinesl až další z významných antických myslitelů Aristoteles, který poukazoval na postupné mizení odplouvající lodi za obzor a na kruhový stín Země při zatmění Měsíce.

První Eratostenovo měření

První historicky známé určení velikosti Země učinil matematik Eratosthenés Kyrénský kolem roku 250 př. n. l. Při návštěvě města Syeny (dnešní Asuán v Egyptě) zjistil, že v době letního slunovratu dopadají v pravé poledne sluneční paprsky až na dno hluboké studny. Usoudil, že Slunce v té době tedy stojí přímo nad studnou a jeho paprsky směřují do středu Země. Za předpokladu, že Slunce je velice daleko, mohl uvažovat, že všechny paprsky dopadají na zem rovnoběžně. Eratosthenés změřil, že v Alexandrii, která leží ve vzdálenosti 5000 stadií (cca 800 km) severněji, je Slunce vzdáleno od zenitu o $\Delta\varphi = 1/50$ kruhu, tj. $7,2^\circ$. Během pokusů došel k myšlence, že tento úhel se rovná středovému úhlu poledníkového oblouku mezi Alexandrií a Asuánem. Poloměr poté určil z délky a velikosti středového úhlu. Pro obvod Země dostal neuvěřitelně přesnou hodnotu 40 000 km a pro poloměr Země zjistil hodnotu $R_Z = 6\,366$ km.



Obr. 12 Eratostenovo měření obvodu Země

(http://cs.wikipedia.org/wiki/Eratosthen%C3%A9s_z_Kyr%C3%A9ny)

Poseidónis a jeho měření

Obdobným způsobem odhadl i Poseidónis velikost Země v 1. století př. n. l. Ve svých měřeních se však dopustil chyby při určení středového úhlu. Na znalosti vzdálenosti mezi Alexandrií a Rhodem a z úhlového rozdílu spodních kulminací hvězdy Canopus na obou místech určil zemský poloměr $R_Z = 5\,300$ km. Právě z tohoto údaje vycházel Ptolemaios při tvorbě první mapy světa i Kryštof Kolumbus při odhadu doby plavby z Evropy do Indie.

Měření v arabském světě

Kolem roku 827 bylo na příkaz arabského chalífy Al-Mámuna provedeno první určování velikosti Země na základě přímého měření délky 1° poledníkového oblouku. Měření se realizovalo mezi Palmyrou a Rakkou v oblasti horního Iráku. Práce uskutečňovaly dvě měřičské skupiny, které postupovaly proti sobě. Každá skupina měřila dvěma provazci o délce přibližně 25 metrů. Konečná délka oblouku jednoho stupně byla jimi stanovena na 56 a $1/3$ míle. Po přepočítání vychází, že délka zemského obvodu je 40 008 384 metrů.

Fernelovo měření

O nové určení rozměrů Země se pokusil v roce 1525 francouzský matematik a astronom Jean Fernel. Pro měření si vybral Paříž a místo poblíž Amiensu, ležící na pařížském meridiánu o 1° severněji. Vzdálenost mezi těmito místy změřil pomocí otáček kol vozu. Zemský obvod, který zjistil, má hodnotu 40 043 343 m a poloměr Země $R_Z = 6\,373$ km.

V současnosti pro délku rovníku, tedy obvod Země, pracujeme s hodnotou 40 075,004 km a pro poloměr Země používáme hodnotu $R_Z = 6\,378,135$ km.

Kosmické rychlosti

Již v díle *Principie*, jehož autorem je I. Newton, je zveřejněna myšlenka, co se stane, budeme-li rychlost koule vystřelené horizontálně z děla na věži o výšce h nad zemským povrchem zvyšovat. Jak ukázal Galileo, koule se pro malé rychlosti v pohybuje po části paraboly a na zem dopadne za čas

$$t_0 = \sqrt{\frac{2h}{g}}, \quad (30)$$

kde g je normální tíhové zrychlení. Koule přitom doletí do vzdálenosti d dané vztahem:

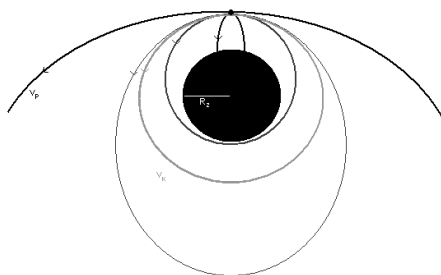
$$d = vt_0 = v\sqrt{\frac{2h}{g}}. \quad (31)$$

Budeme-li dále zvyšovat rychlost koule, bude koule dopadat dál a dál od věže. Při velkých vzdálenostech d se začne projevovat zakulacení zemského povrchu a při určité rychlosti koule na povrch Země nespadne a opíše celou parabolu.

Při určité hodnotě rychlosti v nastane případ, že koule opíše kružnici, jejímž středem bude střed Země. Tato rychlost se nazývá kruhová rychlost v_k . Veličina kruhová rychlost charakterizuje pohyb některých družic Země. Její hodnotu lze určit pomocí vztahu

$$v_k = \sqrt{\frac{GM_Z}{R_Z}}, \quad (32)$$

kde uvažujeme kouli v blízkosti povrchu Země, M_Z hmotnost Země a R_Z poloměr Země. Vztah pro kruhovou rychlost, neboli 1. kosmickou rychlost získáme z podmínky, že velikost gravitační síly F_g , která směřuje do středu Země, je rovna velikosti síly dostředivé F_d . První kosmická rychlost je nejmenší rychlost, jakou může obíhat satelit kolem Země, aniž by hrozilo, že spadne. Její hodnota po dosazení nám již známých konstant je $v_k \approx 7,9$ km/s.



Obr. 13 Náčrt trajektorií kosmických rychlostí vzhledem k povrchu Země

Jestliže kouli ve výšce h udělíme počáteční rychlost o něco větší než je kruhová rychlost v_k , začne se koule opět pohybovat po elipse. Se zvyšováním rychlosti se protahuje tvar elipsy. Při rychlosti v_p dané vztahem

$$v_p = \sqrt{\frac{2GM_Z}{R_Z}} = v_k \sqrt{2} \quad (33)$$

se změni uzavřená trajektorie elipsy na parabolu a těleso se trvale vzdaluje od Země. Tuto rychlost v_p nazýváme rychlost parabolická, nebo také úniková či druhá kosmická rychlost a je to nejmenší možná rychlost, jaké musíme docílit, pokud bychom chtěli vyslat družici mimo

dosah gravitačního působení Země. Vztah pro druhou kosmickou rychlost lze odvodit z podmínky, že celková energie je rovna nule. Její hodnota je $v_p \approx 11,2$ km/s.

Nejmenší rychlost, která dovolí družici opustit sluneční soustavu je označována jako třetí kosmická rychlost. Její hodnota je $v_3 \approx 16,6$ km/s.

Faradayova konstanta F

S Faradovou konstantou se setkáváme také mezi základními fyzikálními konstantami. Podobně jako konstanta Avogadrova popisuje tato konstanta vlastnosti souborů částic. Je pojmenována podle anglického fyzika, chemika a experimentátora, objevitele elektromagnetické indukce, Michaela Faradaye, jenž se narodil nedaleko Londýna v roce 1791. Začátkem 19. století prováděl M. Faraday první pokusy v oblasti elektřiny. Ve 40. letech 19. století vylepšil způsob osvětlení majáků. V roce 1845 objevil magnetické stáčení polarizační roviny a dalšími objevy obohatil poznatky diamagnetismu a elektromagnetického pole.

Zrod Faradovy konstanty spadá do prací o elektrolýze. Sám Faraday vyslovil dva zákony vztahující se k elektrolýze. První nám říká, že hmotnost m látky vyloučené na elektrodě je úměrná prošlému náboji Q , tedy

$$m = AQ, \quad (34)$$

kde konstantou úměrnosti A je elektrochemický ekvivalent. Druhý Faradayův zákon o elektrolýze nás seznamuje s myšlenkou, že elektrochemický ekvivalent látky vypočítáme, pokud její molární hmotnost vydělíme Faradayovou konstantou a počtem elektronů potřebných k vyloučení jedné molekuly,

$$A = \frac{M_m}{Fz}. \quad (35)$$

Látková množství různých látek, která se vyloučí při elektrolýze stejným nábojem, jsou chemicky ekvivalentní. V tomto vzorci nám M_m představuje molární hmotnost vyloučené látky, z je nábojové číslo iontů látky a F je Faradayova konstanta.

Určení Faradayovy konstanty

Faradayovu konstantu můžeme nejlépe určit z vyjádření Faradayových zákonů, tj.

$$m = \frac{M_m}{z} \frac{Q}{F}. \quad (36)$$

V tomto vztahu se ukazuje fyzikální význam Faradayovy konstanty. Je to tedy fyzikální veličina, která se číselně rovná náboji Q , jímž se na elektrodě vyloučí hmotnost m látky, jenž je rovna molární hmotnosti vydělené nábojovým číslem M/z .

Stanovit hodnotu Faradayovy konstanty můžeme experimentálně nebo výpočtem pomocí předešlých experimentů. Pro výpočet platí

$$F = N_A e, \quad (37)$$

kde N_A a e jsou nám již dobře známé konstanty, Avogadrova konstanta a elementární elektrický náboj. Faradayovu konstantu je možno měřit coulombmetrickou metodou v přístrojích, jenž se označují coulombmetry. Po rozsáhlých měřeních v druhé polovině 20. století byla hodnota konstanty určena $F = 9,648\,531 \cdot 10^4$ C · mol⁻¹. Přesnost měření pomocí této metody můžeme zvýšit při coulombovském měření stříbra, zlepšením čistoty anody, přesnějším určením hodnoty atomové hmotnosti stříbra.

Klidová hmotnost elektronu m_e

Další fundamentální fyzikální konstantou je klidová hmotnost elektronu. Nejčastěji se určuje pomocí jiné důležité veličiny a tou je měrný náboj elektronu, což je elementární náboj dělený hmotností elektronu. Při této metodě je tedy nezbytné znát jen velikost elementárního náboje.

Hmotnost elektronu pomocí měrného náboje

Poprvé byl měrný náboj určován v devadesátých letech 19. století. Téměř zároveň ho zjistili fyzikové zabývající se zkoumáním katodových paprsků. Byli to Wilhelm Carl Werner Wien, Georgie Francis Fitzgerald a Joseph John Thomson, kteří věděli, že katodové paprsky je možno vychýlit pomocí magnetického a elektrostatického pole.

Mezi nejzajímavější metody, jak zjistit měrný náboj elektronu, patří metoda výchylek, kterou postupně upřesňovali Thomson (1897), Classen (1907) a Dunnington (1937). Jejich výsledky pro měření měrného náboje se pohybovaly okolo hodnoty $1,76 \cdot 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$. Jinou alternativou je metoda vysokofrekvenčního měření rychlosti, jíž se zabývali zejména Perry a Chaffee kolem roku 1930 a o něco později Kirchner. Tato metoda je založena na měření rychlosti elektronů známé energie. V 30. letech 20. století se Campbell, Houston a Kinsler zaměřovali vytvořením jiné metody měření. Určovali elementární náboj dle rozštěpení spektrálních čar v magnetickém poli na principu Zeemanova jevu. Tímto měřením došli k závěru, že $e/m_e = 1,757 \cdot 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Na základě těchto úspěšných měření a zásluhou Millikanova určení velikosti elementárního náboje byla zjištěna během času po postupném zpřesňování měření klidová hmotnost elektronu $m_e = 9,109\,390 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

Klidová hmotnost protonu

Metoda stanovení hodnoty základní fyzikální konstanty označované jako klidová hmotnost protonu závisí na určování hmotnosti atomu vodíku. Hodnota této konstanty je $m_p = 1,672\,623 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Permitivita ε_0 a permeabilita vakua μ_0

Stejně jako elementární náboj patří i permitivita a permeabilita do kapitoly elektřiny a magnetismu. Tyto konstanty jsou spojeny s rychlostí světla, neboli s přenosem elektromagnetických vln ve vakuu vztahem:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}. \quad (38)$$

Permitivita vakua byla odvozena ze součinitele úměrnosti K v Coulombově zákoně. O její zjištění se experimentálně zasloužili fyzikové Rosa a Dorsey. Mezi součinitelem K a permitivitou ε_0 platí vztah:

$$K = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}. \quad (39)$$

Vypočtená hodnota konstanty permitivity vakua je $\varepsilon_0 = 8,854\,188 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$.

Permeabilitu vakua můžeme nalézt v zákonech týkajících se magnetického pole a vodičů s proudem ve vakuu.

Hodnota této konstanty je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2} = 1,256\,637 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$.

FYZIKA JAKO VĚDA

Fyzika (z řeckého φυσικός (*physikos*): *přírodní*, ze základu φύσις (*physis*): *příroda*) je vědní obor, který zkoumá zákonitosti přírodních jevů. Popisuje vlastnosti a projevy hmoty, antihmoty, vakua, přírodních sil, světla i neviditelného záření, tepla, zvuku atd. Vztahy mezi těmito objekty fyzika obvykle vyjadřuje matematickými prostředky.

Rozdělení fyziky

Rozdělení fyziky podle metod:

Teoretická

Experimentální

Numerické simulace

Aplikovaná

Teoretická fyzika – z matematických a fyzikálních objevů a experimentálních výsledků vyvozuje obecnější platnost zákonů a určuje teoretické hranice jejich platnosti.

- zvaná též matematická fyzika analyzuje výsledky experimentů, zobecňuje a porovnává je. Pomocí matematických metod a modelů formuluje fyzikální zákony, většinou ve formě matematických vzorců a rovnic. Snaží se vytvářet fyzikální teorie, které by zahrnovaly co nejširší skupinu pozorovaných jevů, popř. předpovídaly i jevy nové.

Experimentální fyzika – potvrzuje nebo vyvrací existující teorie, může dojít k novým objevům.

- zkoumá přírodní zákonitosti metodou provádění pokusů, při nichž se za přesně definovaných podmínek pozoruje a měří průběh zkoumaného jevu. Při těchto experimentech je třeba se soustředit na podstatu konkrétního děje a pokud možno odizolovat nebo zkorrigovat všechny rušivé vlivy, které by mohly zkreslit výsledky pozorovaného děje.

Éra jednoduchých mechanických experimentů patří minulosti, nynější experimentální fyzika pracuje s velmi složitými aparaturami s elektronickým počítačovým vyhodnocováním. Např. obrovské urychlovače elementárních částic, vybavené precizní detekční elektronikou, jsou nejsložitějšími zařízeními, jaké kdy lidé sestrojili.

Numerické simulace – simulují důsledky přírodních zákonů za určitých podmínek a dávají předpovědi ověřitelné pozorováním.

Aplikovaná fyzika – vychází z potřeb praxe. Její rozvoj je motivován potřebami z výroby, lidské spotřeby a z potřeby ochrany životního prostředí.

- zvaná též technická fyzika se zabývá tvůrčím uplatněním fyzikálních poznatků z experimentů a teorie v různých oblastech vědy a techniky, průmyslu, medicíny atd. Veškeré vymoženosti moderní techniky (zvláště pak elektroniky) jsou založeny na aplikaci fyzikálních poznatků.

Rozdělení fyziky na mechaniku, termiku, elektřinu, optiku a atomistiku, případně další obory, je rozdělení *tematické*, tedy podle *předmětu studia* těchto oborů.

Rozdělení na fyziku teoretickou a experimentální je rozdělení *metodologické*, čili rozdělení podle *způsobu* zkoumání přírody a používaných prostředků.

Rozdělení na fyziku klasickou, relativistickou a kvantovou je rozdělení *koncepční*, to znamená podle výchozích *předpokladů*, podle přijatých *představ* o fyzikálním obrazu světa.

Tabulka 8 Orientační přehled oborů a podoborů fyziky

Obor	Podobory	Hlavní teorie	Témata
Mechanika	Mechanika hmotných bodů a tuhého tělesa; analytická mechanika; gravitační silové pole; mechanika kontinua – mechanika pružnosti a pevnosti, mechanika tekutin, reologie a mechanika sytkých látek; speciální teorie relativity; mechanické kmitání a vlnění, akustika; mechanika chaotických systémů	Newtonovy pohybové zákony, Newtonův gravitační zákon, diferenciální (např. d'Alembertův) a integrální (např. Hamiltonův) principy mechaniky, Lagrangeovy pohybové rovnice, Hamiltonovy kanonické rovnice, Hamiltonova-Jacobiho rovnice, Lagrangeova formulace teorie pole a teorém Noetherové, Einsteinův princip relativity, teorie chaosu	síla, práce, energie, hybnost, zákony zachování, deformace, proudění, Poissonovy závorky, Lagrangeova funkce, Hamiltonova funkce, Lorentzova transformace, kontrakce délek, dilatace času, relativita současnosti, vlnová rovnice, atraktor
Termika	Termokinetika, tepelné děje v plynech, fázové přeměny, termodynamika směsí a chemická termodynamika, termodynamika kondenzovaného stavu, termodynamika záření, nerovnovážná termodynamika	Zákony termodynamiky, Gibbsovo fázové pravidlo, Clausiusova-Clapeyronova rovnice, Stefanův-Boltzmannův zákon, Planckův vyzařovací zákon	teplota, stavové rovnice, teplo a jeho šíření, tepelné stroje, entropie, fáze, záření absolutně černého tělesa
Molekulová stavba látek (molekulová fyzika) a statistická fyzika	Kinetická teorie látek, molekulová fyzika plynu, klasická (Maxwellova-Boltzmannova) statistická fyzika, molekulová stavba kapalin, molekulová fyzika pevných látek, krystalografie, statistická fyzika fermionů a bosonů, fyzika plazmatu, statistická fyzika záření, fyzikální kinetika a transportní jevy; fyzika chaotických systémů	Liouvilleův teorém; ekvipartiční teorém; Boltzmannův zákon; Maxwellovo-Boltzmannovo, Fermiho-Diracovo a Boseho-Einsteinovo rozdělení; grupy krystalové symetrie, transportní teorie, teorie chaosu	molekula; fázový prostor; mikrokantický, kanonický a grandkanonický soubor; povrchové napětí; kovalentní, iontová a kovová vazba, krystalová mřížka, krystalografická soustava; plazma; difuze, osmóza; viskozita, atraktor
Fyzika elektromagnetismu	Elektrostatika, elektrický proud v pevných látkách, kapalinách a plynech, elektrické obvody a jejich řešení, stacionární magnetické pole, nestacionární elektromagnetické pole, elektromagnetické vlnění, materiálové elektromagnetické vlastnosti látek, magnetohydrodynamika	Coulombův zákon, Gaussův zákon elektrostatiky, Ampérův zákon, Biotův-Savartův zákon, Ohmův zákon, Faradayův zákon elektromagnetické indukce, Maxwellovy rovnice, Lorentzova mikroskopická teorie, speciální teorie relativity	elektromagnetické pole, intenzita elektrického pole, elektrický potenciál a napětí, magnetická indukce, vektorový potenciál magnetického pole, elektrický proud, elektrický vodič, dielektrikum, elektrický obvod

Optika	Vlnová optika, šíření světla prostředím, paprsková optika, geometrická optika, fotometrie, optika barev, kvantová optika	Huygensův-Fresnelův princip, Fermatův princip, Snelliův zákon lomu, Fresnelovy rovnice	vlnoplocha, koherence, interference světla, difrakce světla, polarizace, dvojlom, zrcadlo, čočka, zvětšení, svítivost, jas, barva, foton
Atomová fyzika (atomistika) = fyzika atomového obalu	Modely atomu, kvantová mechanika, atomová astrofyzika, kvantová chemie, spektrální optika, interakce záření s hmotným prostředím, fotonika	Bohrův-Sommerfeldův model atomu, kvantová teorie, fyzika kvantové informace	foton, atom, Schrödingerova rovnice, Diracova rovnice, atomový orbital, molekula, chemická vazba, elektromagnetické záření, laser, polarizace, spektrální čára, rozptyl světla, ionizace, Casimirův jev
Fyzika kondenzovaného stavu	fyzika pevných látek, fyzika vysokých tlaků, fyzika nízkých teplot, fyzika povrchů, nanotechnologie, fyzika polymerů	pásová teorie, BCS teorie, Blochova vlna, fermiův plyn, fermiova kapalina	skupenství (plynné, kapalné, pevné, Boseho-Einsteinův kondenzát, supravodič, suprařekutina), elektřina, magnetismus, metamateriály, spin, samorganizace, spontánní narušení symetrie
Jaderná a subjaderná fyzika	Fyzika atomového jádra, radioaktivita, jaderné reakce, neutronová fyzika, ionizující záření a jeho průchod prostředím, dozimetrie, fenomenologie elementárních částic, kvarkový model, jaderná a částicová astrofyzika,	standardní model, kvantová teorie pole, kvantová elektrodynamika, kvantová chromodynamika, elektroslabá interakce, kalibrační invariance, supersymetrie, teorie velkého sjednocení, teorie superstrun, M-teorie	základní interakce (gravitační, elektromagnetická, slabá, silná), elementární částice, lepton, kvark, spin, antihmota, spontánní narušení symetrie, oscilace neutrin, brána, superstruna, kvantová gravitace, teorie všeho, energie vakua
Astrofyzika	kosmologie, fyzika gravitace, astronomie vysokých energií, planetární vědy, fyzika plazmatu, fyzika hvězd	velký třesk, lambda-CDM model, kosmická inflace, obecná relativita, Newtonův gravitační zákon	černá díra, reliktní záření, kosmická struna, vesmír, temná hmota, temná energie, galaxie, gravitace, gravitační vlny, planeta, sluneční soustava, hvězda, supernova
Aplikovaná fyzika	fyzika urychlovačů, akustika, agrofyzika, astronautika, biofyzika, chemická fyzika, dynamika dopravních prostředků, ekonofyzika, fyzikální eroze, inženýrská fyzika, geofyzika, lékařská fyzika, fyzika materiálů, mechanika, meteorologie, měřicí přístroje, fyzika moří, nanotechnologie, teoretická elektrotechnika a radiotechnika, optika, optoelektronika, fotovoltaika, fyzikální chemie, fyzika počítačů, fyzika pevných látek, fyzika jaderných reaktorů, fyzika plazmatu, kvantová chemie, kvantová elektronika, fyzika kvantové informace, sportovní fyzika, statika staveb, dynamika tekutin, fyzika telekomunikací		

Historie fyziky

Počátky fyziky lze hledat ve starověku. Vrcholem poznání bylo učení Aristotela. Významné období pro rozvoj fyziky byla renesance – přednewtonovské období (L. da Vinci, G. B. Benedetti, Galileo Galilei, V. Viviani, G. A. Borelli, R. Hooke, M. Marci, Ch. Huygens). Galileo provádí první experimenty. Kepler odvodil zákony pohybu planet. Descartes zavedl kartézské souřadnice a položil základy matematizace fyziky.

Newtonova syntéza (1687) – vydává stěžejní dílo *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Matematické základy filosofie přírody). Newtonovská mechanika vládne fyzice do 20. století.

Do konce 18. stol. byly známy jen některé jevy z elektřiny a magnetismu, a to pouze kvalitativně a bez vzájemné souvislosti. Roku 1785 provedl Coulomb fundamentální experiment, při němž měřil elektrostatické síly na torzních vahách. Kvantitativně formuluje silové působení mezi dvěma bodovými náboji.

Čtyři experimentální pilíře elektromagnetismu

1. Coulombův zákon elektrostatiky – základní pilíř
2. Na základě experimentů Biota, Savarta formuluje roku 1821 Laplace zákon – druhý pilíř elektromagnetismu, zákon o magnetických účincích elektrického proudu.
3. Třetí pilíř – zákon o silovém působení magnetického pole na proudový element – formuluje Ampère na základě svého fundamentálního experimentu z roku 1826.
4. Roku 1831 objevuje M. Faraday zákon elektromagnetické indukce. K němu dospívá po sedmiletém experimentování (zákon lze z části teoreticky odvodit z předchozích zákonů) – pak jde o fundamentální experimenty verifikační.

Rok 1873 – Maxwellova syntéza a vznik teorie elektromagnetického pole. Maxwellovy rovnice elektromagnetického pole zobecňují experimentální poznatky elektrodynamiky. Významným intuitivním Maxwellovým doplněním bylo zavedení posuvného (Maxwellova) proudu v dielektriku, který má rovněž magnetické účinky.

Jedním z nejvýznamnějších důsledků Maxwellovy teorie byl poznatek, že rozruchy elektromagnetického pole se šíří formou transverzálních elektromagnetických vln.

Maxwell také vypočítal rychlost šíření těchto vln – je shodná s rychlostí šíření světla ve vakuu. Z toho vyvodil, že světlo je elektromagnetické vlnění. Teoreticky odvodil vlastnosti elektromagnetických vln na rozhraní dvou různých prostředí – platí stejné zákony jako pro světlo (zákon odrazu, Snellův zákon, polarizace) – vytvořil pak elektromagnetickou teorii světla.

Experimentální potvrzení teorie šíření elektromagnetických vln předložil až v roce 1888 Hertz.

Obecná teorie relativity a teorie gravitace

Speciální teorie relativity STR (Einstein, 1905) – má úspěchy (přehodnocení pohledu na prostor a čas s důsledky v mechanice a elektrodynamice); ale i nedostatky (nezahrnuje gravitaci).

Obecná teorie relativity OTR (Einstein, 1907 – 1915)

1. východisko: rozšíření na neinerciální soustavy

2. východisko: Machův princip (1872) o původu setrvačných sil

3. východisko: rovnost setrvačné a gravitační hmotnosti (zkoumání trvajících 300 let – od Galileje (1590) a vrcholící velmi přesnými měřeními R. Eötvöse (1896))

Ucelené teorie kvantové mechaniky ve dvacátých letech formulovali Heisenberg („*maticová mechanika*“) a Schrödinger („*vlnová mechanika*“), který dokázal ekvivalenci obou přístupů. Teorii značně zdokonalili Paul Dirac a John von Neumann.

Souběžně s kvantovou mechanikou se fyzici snažili popsat kvantově i pole. V jazyce kvantové teorie pole se pak na přelomu 20. století podařilo popsat elektromagnetismus, o což se zvláště zasloužili Richard Feynman a Julian Schwinger. V druhé polovině 20. století pak byla v rámci jedné teorie popsána i slabá a silná interakce, a zároveň předpovězena či vysvětlena existence mnoha elementárních částic. Současnou všeobecně uznávanou teorií elementárních částic a interakcí je standardní model.

Na pomezí fyziky, matematiky a počítačové vědy od 70. let 20. století vznikl nový směr poznání, nazývaný teorie chaosu. Předmětem zkoumání jsou fraktály a nelineární systémy.

Významná část fyziků považuje za obecný cíl snažení fyziky jednotný popis fyzikálních jevů, nejlépe v rámci jedné teorie (teorie všeho, finální teorie atp.). Z tohoto pohledu je největším problémem soudobé fyziky rozpor mezi standardním modelem, popisujícím tři interakce v rámci kvantové teorie pole, a Einsteinovou obecnou teorií relativity, popisující čtvrtou interakci – gravitaci – která kvantová není. Po desetiletích pokusů se stalo zřejmé, že kvantovou teorií gravitace (nebo obecněji „teorii všeho“) nelze vytvořit v rámci jazyka kvantové teorie pole.

Většina fyziků považuje za nadějněho kandidáta na rámec, ve kterém kvantovou teorií gravitace bude možné formulovat, teorii strun. Teorie strun se rozvíjí přibližně od 80. let 20. století.

Velké úsilí se v současnosti věnuje nalezení Higgsova bosonu.

Skutečně opodstatněné a objektivní dělení přírody podle převládajících a určujících fyzikálních zákonitostí je následující:

Makrosvět

Je to ta část přírody, kde platí běžné a dobře známé a ze zkušenosti vypozerované zákonitosti klasické fyziky (tj. nerelativistické a nekvantové) – Newtonovy zákony klasické mechaniky, zákony klasické elektrodynamiky atd. Kromě běžných těles zde na Zemi to jsou např. i planety sluneční soustavy.

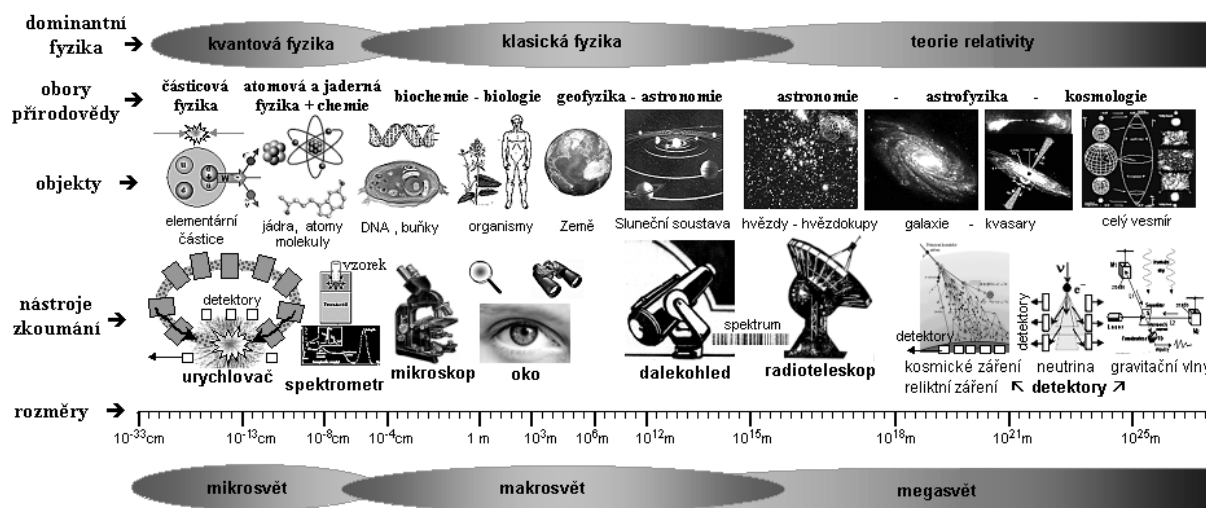
Mikrosvět

Zkoumáme-li detaily složení hmoty v měřítcích menších než cca 10^{-8} cm, tj. v atomárních a subatomárních měřítcích, zjišťujeme, že některé zákonitosti klasické fyziky zde již dobře a přesně „nefungují“, ztrácejí platnost a musí být nahrazeny zákony kvantové fyziky. Strohý determinismus klasické fyziky zde již neplatí a je nahrazen stochastickými zákonitostmi „rozmazaných“ a vlnících se částic.

Megasvět

Podobně když jdeme do velkých vzdáleností a měřítek vesmíru v kosmologii, cca 10^6 světelných let a větších, přestávají rovněž přesně fungovat některé zákonitosti klasické fyziky

a objevují se zákonitosti nové – zákony Einsteinovy speciální a především obecné teorie relativity. Dominantní roli pro stavbu a vývoj vesmíru zde začíná hrát zakřivení prostoročasu. V této souvislosti je třeba zmínit efekty temné hmoty (84 % látky ve vesmíru a 23 % hmoty včetně energie) a temné energie (72 % z hmoty a energie ve vesmíru), pro které dosud nemáme důkladné vysvětlení (na rozdíl od obecné teorie relativity). Více na stránkách: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2011_39_nob.php



Obr. 14 Široké spektrum velikostí objektů našeho světa, zkoumaných různými obory fyziky a přírodovědy pomocí různých nástrojů.

Mechanika (klasická mechanika)

je nejstarším oborem fyziky, který se zabývá nejzákladnějšími zákonitostmi pohybu těles. K vyšetřování pohybu těles, který je jak známo relativní, je třeba zavést vztažnou soustavu tvořenou 3 prostorovými souřadnicemi a měřením času. V mechanice se nejčastěji používá tzv. inerciální vztažná soustava, v níž je splněn Newtonův zákon setrvačnosti. Tři prostorové souřadnice a jedna časová tvoří 4-rozměrný prostoročas, který je v rámci klasické mechaniky pouhou myšlenkovou konstrukcí, avšak hraje klíčový význam v teorii relativity. Vlastním popisem pohybu – tvar dráhy, rychlost, zrychlení – se zabývá kinematika (bez analýzy příčin tohoto pohybu).

Silovým působením těles a vztahem síly a pohybu se zabývá dynamika, která je založena na třech proslulých Newtonových zákonech: zákonu setrvačnosti, zákonu síly a zrychlení a zákonu akce a reakce. Při popisu pohybu pevných těles se často používá aproximace hmotného bodu: těleso se nahradí jeho těžištěm, do něhož se soustředí veškerá hmotnost tělesa. Součástí klasické mechaniky je i Newtonův gravitační zákon a jeho aplikace na „nebeskou mechaniku“ pohybů planet ve sluneční soustavě. Vlastnostmi pohybů v kapalinách a plynech se zabývá hydrodynamika a aeromechanika, které jsou součástí mechaniky kontinua.

Termika a termodynamika

se zabývá tepelnými jevy – podstatou tepla, teplotou, přenosem a šířením tepla, přeměnami tepelné energie. Úzká souvislost termiky s mechanikou spočívá v kinetické teorii tepla, podle níž je teplo projevem kinetické energie pohybů atomů či molekul dané látky. Termodynamika zformulovala tři základní zákony:

1. zákon termodynamiky – zákon zachování energie;
2. zákon termodynamiky – samovolný přechod tepla jen z teplejšího na chladnější těleso, jinak též zákon růstu entropie izolované soustavy;
3. zákon termodynamiky – nemožnost dosažení teploty absolutní nuly (0 K) konečným počtem kroků.

Termodynamika dále studuje závislosti objemů, tlaků, hustot na teplotě, fázové přechody atd. Termodynamika nerovnovážných systémů – synergetika – ve své koncepci „organizovaného chaosu“ nabízí zajímavé možnosti pochopení procesů evoluce hmoty a snad i mechanismů vzniku života.

Elektrina a magnetismus – elektrodynamika

zkoumá elektrické a magnetické jevy. Nositeli elektrických vlastností – elektrických nábojů – jsou základní elementární částice: protony (+) a elektrony (–). Základním zákonem elektřiny je Coulombův zákon elektrostatiky o vzájemném silovém působení elektrických nábojů. Pohybem elektrických nábojů vzniká magnetické pole, pohybem nebo časovou proměnností magnetického pole se indukují elektrické a naopak. Sloučená nauka o elektřině a magnetismu se nazývá elektrodynamika, v níž je elektromagnetické pole popsáno Maxwellovými rovnicemi. Proměnné elektromagnetické pole se může prostorem (i ve vakuu) šířit ve formě elektromagnetických vln, a to rychlostí světla.

Optika

je nauka o vzniku, šíření a vlastnostech světla. Úzká souvislost s elektrodynamikou je dána tím, že světlo není ničím jiným než elektromagnetickým vlněním o příslušné vlnové délce. Vlnová délka viditelného záření – světla je v rozmezí od cca 750 nm (vidíme jej jako červené světlo) do cca 360 nm (fialové světlo); optika se však zabývá i blízkými oblastmi infračerveného a ultrafialového záření. Různá rychlost elektromagnetického vlnění v různých látkových prostředích je příčinou lomu světla, od některých předmětů se světlo odráží, jindy je pohlcováno. Geometrická optika studuje zákony lomu a odrazu světla a jejich využití pro optické zobrazování (v mikroskopech či dalekohledech). Vlnová optika pak vlnové projevy světla, jako je ohyb, interference, polarizace. Kvantová optika studuje procesy vyzařování a absorpce světla na kvantové atomární a molekulární úrovni. Tyto procesy jsou využívány ve spektrometrii a v optoelektronice při vzájemné přeměně světelných a elektrických signálů.

Atomová a jaderná fyzika

zkoumá stavbu a vlastnosti atomů a atomových jader, v kontextu s vlastnostmi elementárních částic. Podává podrobný obraz detailů struktury hmoty a přesvědčivě vysvětluje řadu důležitých jevů na atomární a subatomární úrovni, od nichž se odvíjí všechny vlastnosti a projevy hmoty, včetně radioaktivity i chemických reakcí. Aplikace zákonitostí jaderné fyziky na jevy ve vesmíru – tzv. jaderná astrofyzika – dokáže vysvětlit původ prvků ve vesmíru (nukleosynéze) i fungování hvězd (termonukleární reakce v jejich nitru).

Vedle specializovaných fyzikálních oborů, zabývajících se konkrétními skupinami jevů, jsou součástí struktury fyziky i dvě významné teoretické koncepce moderní fyziky, které mají obecnější charakter a jdou „napříč obory“:

Teorie relativity – speciální a obecná

Speciální teorie relativity, zformulovaná A. Einsteinem v r. 1905, se zabývá fyzikálními zákonitostmi při vysokých rychlostech pohybu, blízkých rychlosti světla. Ukazuje, že rychlost světla je univerzální konstantou, nezávislou na pohybovém stavu zdroje a pozorovatele, je to maximální rychlost šíření interakcí. Při vysokých rychlostech dochází ke změnám prostorových měřítek a chodu času – kontrakci délek a dilataci času. Rovněž setrvačná hmotnost těles je při rychlém pohybu větší než hmotnost klidová (a při přiblížení rychlosti světla dokonce roste k nekonečnu!). Kromě astrofyziky a kosmologie se speciální teorie relativity zásadním způsobem uplatňuje ve fyzice elementárních částic, pohybujících se vysokými rychlostmi.

Veškeré elektromagnetické jevy mají ve svých základech implicitně obsaženy zákonitosti speciální teorie relativity.

Obecná teorie relativity, završená rovněž A. Einsteinem v r. 1916, je relativistickou teorií gravitace a zároveň prostoročasu. Na základě univerzálnosti gravitační interakce, vyjádřené v lokálním principu ekvivalence, je gravitační pole interpretováno jako zakřivený prostoročas. Hmota svým tenzorem energie-hybnosti zakřivuje prostoročas, tj. budí gravitační pole, podle Einsteinových rovnic gravitačního pole. Tento Einsteinův gravitační zákon zpřesňuje a zobecňuje klasický Newtonův gravitační zákon na situaci silných gravitačních polí. Obecná teorie relativity hraje klíčovou úlohu v astrofyzice (konečná stádia evoluce hvězd – gravitační kolaps, neutronové hvězdy, černé díry, horizonty) a v kosmologii (vznik, stavba a vývoj vesmíru, kosmologické modely, inflační expanze vesmíru apod.).

Kvantová fyzika

Při studiu spekter elektromagnetického vyzařování, fotoefektu a zákonitostí mikrostruktury hmoty, byla v prvních dekádách 20. století zformulována kvantová mechanika, podle níž je elektromagnetické záření vyzařováno nikoli kontinuálně, ale po kvantech. Vlny se mohou chovat jako částice, částice zase jako vlny – korpuskulárně-vlnový dualismus. Deterministické zákony klasické fyziky jsou zde nahrazeny stochastickými zákony kvantovými, umožňujícími stanovit pouze pravděpodobnosti jednotlivých konkrétních jevů. Bohrův model atomu, po svém dalším zdokonalení, velmi dobře vysvětluje všechny pozorované jevy s atomy, včetně spekter jejich záření. Aplikace kvantových zákonitostí na teorii pole vedla ke vzniku kvantové teorie pole, která pomocí kvantově oscilujících polí, ekvivalentních částicím, velmi dobře vysvětluje interakce elementárních částic v mikrosvětě.

V přírodovědě (a ve fyzice zvláště) platí kontinuita vědeckého poznání. Nové objevy a nová teorie nevyvrací experimentálně ověřené poznatky předchozí teorie, nýbrž doplňuje, upřesňuje a zobecňuje tuto teorii na jevy, které již není schopna vysvětlit; přitom obsahuje dřívější teorii jako limitní případ. Umožňuje hlubší chápání jevů v širší perspektivě – co je „za tím“. Můžeme si to přiblížit na příkladu teorie relativity a kvantové fyziky. Einsteinova speciální teorie relativity nevyvrací klasickou Newtonovskou mechaniku, která je jejím limitním případem pro rychlosti malé ve srovnání s rychlostí světla. Upřesňuje však zákony pohybu tak, aby přesně platily i pro vysoké rychlosti. Podobně obecná teorie relativity nevyvrací klasický Newtonův gravitační zákon, který zůstává v platnosti jako limitní případ slabých gravitačních polí. Einsteinovy rovnice gravitačního pole jsou zobecněním, platným i pro extrémně silnou gravitaci. To zásadní a nové, co přináší teorie relativity, je nový pohled na vlastnosti prostoru a času.

Podobně vztah mezi klasickou a kvantovou fyzikou se formuluje jako tzv. princip korespondence: V limitě velkých kvantových čísel se stírá rozdíl mezi kvantovou a klasickou fyzikou,

kvantová fyzika přechází v klasickou. Neboli pro velká kvantová čísla dává kvantová fyzika stejné výsledky jako fyzika klasická.

Dalším důležitým principem při budování fyzikálních (a obecně přírodovědeckých) teorií je jednoduchost a logická úspornost z hlediska zaváděného množství pojmů, důvodů, příčin; tyto entity se nemají zmnožovat více, než je nezbytné. Tento princip tzv. Occamovy břitvy – princip nejjednoduššího vysvětlení věci – řeší problém nekonečného množství rozmanitých, v principu přípustných alternativních teorií, které vedou ke stejným výsledkům při vysvětlování určitého přírodního jevu. Occamova břitva „odřezává“ nadbytečné pojmy, předpoklady a teorie a ponechává jen ty věrohodné, logicky nutné a racionální; pokud pro nějaký jev existuje více vysvětlení, je rozumné dávat přednost tomu nejméně komplikovanému.

Název Occamova břitva – podle anglického středověkého filozofa Williama Occama (či Ockcama, 1287–1347), který se zabýval logickou stavbou vědění. Princip logické úspornosti („je zbytečné dělat něco s větším počtem nástrojů, když to může být uděláno s menším“) používal proti nadbytečnému množství scholastických principů, vlastností, podstat, forem a dalších vymyšlených východisek.

V teoriích klasické a relativistické fyziky je tento princip důsledně dodržován. V některých novějších fyzikálních teoriích je však situace složitější. V kvantové teorii pole a unitárních teoriích se zavádějí pomocná tzv. kalibrační pole, jimž odpovídají nové hypotetické částice.

Unitarizace ve fyzice

Základem vědeckého myšlení je sjednocování: hledat obecné zákonitosti a společnou podstatu, snažit se vysvětlit různorodost jevů na základě co nejmenšího počtu základních zákonů. Konečným (monistickým) ideálem je vysvětlit všechny přírodní zákony pomocí jediného univerzálního principu – vytvořit definitivní finální teorii či jednotnou „teorii všeho“.

První etapa unitarizace proběhla vlastně již v samotných začátcích fyziky jako vědy: jednalo se o sjednocení „pozemské“ a „nebeské“ mechaniky. Zasluhou Galilea, Koperníka, Keplera a Newtona se stávalo jasné, že přírodní zákony pozorované zde na Zemi platí i jinde ve vesmíru. Newtonův zákon všeobecné gravitace ukázal, že síla zemské tíže způsobující padání těles je identická se silou udržující planety na oběžných dráhách kolem Slunce, tj. s vesmírnou gravitací.

Do „klasického“ období unitarizace fyziky lze rovněž zařadit sjednocení mechaniky a termiky v kinetické teorii tepla, podle níž podstatou tepelných jevů je kinetická energie neuspořádaného a kmitavého pohybu molekul a atomů v látkách.

Důležitou etapou unitarizace ve fyzice bylo sjednocení elektrických a magnetických sil, které se předtím zdály být zcela různými přírodními silami. Důsledkem jednoty elektřiny a magnetismu ve Faradayově-Maxwellově elektrodynamice je i existence elektromagnetického vlnění, které se vyznačuje při zrychleném pohybu elektrických nábojů. Vlastnosti těchto elektromagnetických vln se ukázaly být identické s vlastnostmi světla: došlo tak navíc ke sjednocení jevů optických a elektromagnetických. Radiovlny, tepelné záření, světlo, rentgenové i gama záření, spolu s klasickými i relativistickými efekty elektřiny a magnetismu, jsou tedy jen různými projevy elektromagnetické interakce.

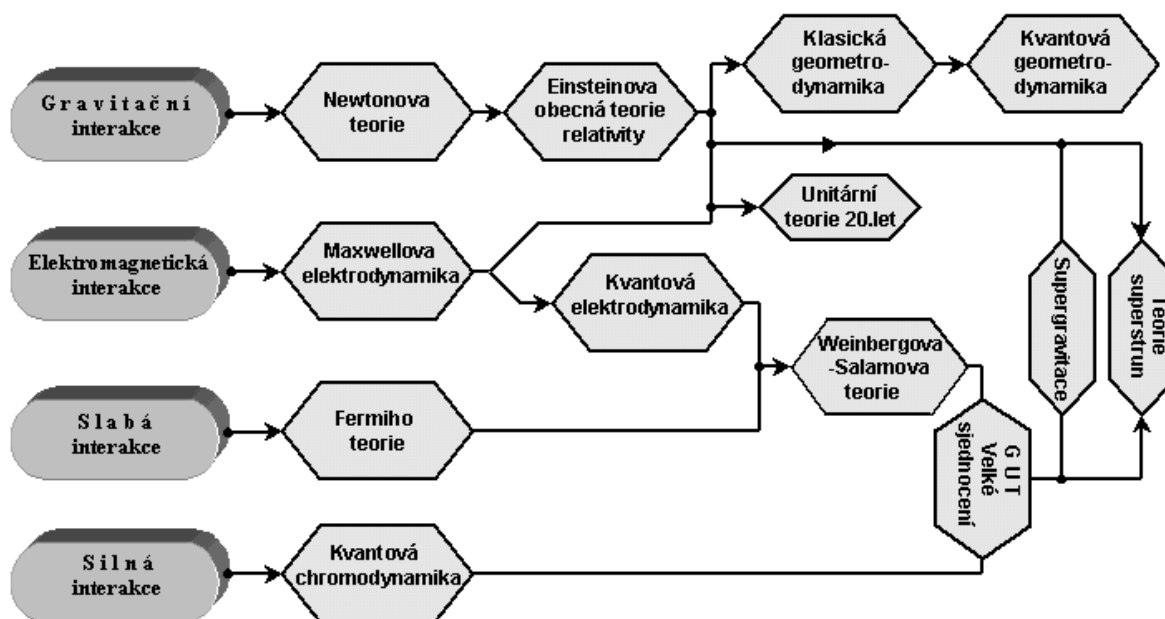
Rozvoj atomistiky a kvantové mechaniky v první třetině 20. století ukázal, že veškerou rozmanitost chemických jevů lze vysvětlit pomocí elektromagnetických interakcí a kvantových zákonitostí v elektronových obalech atomů jednotlivých prvků; totéž platí o fyzikálních vlastnostech pevných těles (pružnost, pevnost, dislokace), kapalin i plynů. Chemie tak byla fakticky „pohlčena“ fyzikou, aspoň co se týče základů.

Další dvě etapy unitarizace souvisejí s teorií relativity. Ve své speciální teorii relativity Einstein sjednotil prostor a čas do jednotného prostoročasového kontinua, v obecné teorii relativity pak ukázal, že Newtonovská gravitace a setrvačnost jsou společným projevem geometrických vlastností (křivosti) prostoročasu, který má dynamický charakter – došlo ke sjednocení gravitace a prostoročasu.

Poslední etapa unitarizace probíhá v oblasti „elementárních“ částic. Obrovské množství experimentálních poznatků o vlastnostech a interakcích elementárních částic, získané v rozmezí 50. – 80. let, zpracovaných a sjednocených v duchu řady kvantově-teoretických koncepcí, vyústilo v tzv. Standardní model elementárních částic a jejich interakcí. Stavební kameny hmoty jsou tvořeny jen 2 „rodinami“ základních (elementárních) částic – 6 leptonů a 6 kvarků, mezi nimiž působí 4 fundamentální síly (interakce): silná, elektromagnetická, slabá a gravitační. První tři z těchto interakcí jsou popsány výměnami intermediálních bosonů se spinem 1: silná interakce je zprostředkována gluony, elektromagnetická interakce fotony, slabá interakce těžkými intermediálními nabitými bosony (W) a neutrálními bosony (Z₀). Pro gravitační interakci zatím není dokončena kvantová teorie, avšak může být popsána intermediálními gravitony (se spinem 2).

Moderní unitarizační snahy probíhají na půdě kvantové teorie polí a jejich cílem je sjednocování fundamentálních interakcí mezi elementárními částicemi – interakcí silných, slabých, elektromagnetických a gravitačních.

První výrazný úspěch na této cestě byl zaznamenán při sjednocování elektromagnetické interakce a slabé interakce v tzv. elektroslabou interakci – jedná se o Weinbergovu-Salamovu-Glashowovu teorii. Další etapa unitarizace se označuje jako velké sjednocení (GUT – *Grand Unification Theory*) – zde se pokoušíme sjednotit silnou interakci, popsanou kvarkovou chromodynamikou, s elektroslabou interakcí. Tyto etapy unitarizace dosáhly značných úspěchů, vedly k vytvoření standardního modelu elementárních částic. Završení unitarizace interakcí v kvantové teorii pole by spočívalo v zahrnutí gravitační interakce, v jejím sjednocení s ostatními třemi druhy interakcí. Tento ambiciózní unitarizační program se označuje jako supersjednocení nebo supergravitace; v současné době se v tomto směru nejintenzivněji pracuje v oblasti tzv. teorie superstrun, zvláště v její nejnovější verzi, tzv. M-teorii.



Obr. 15 Sjednocení interakcí

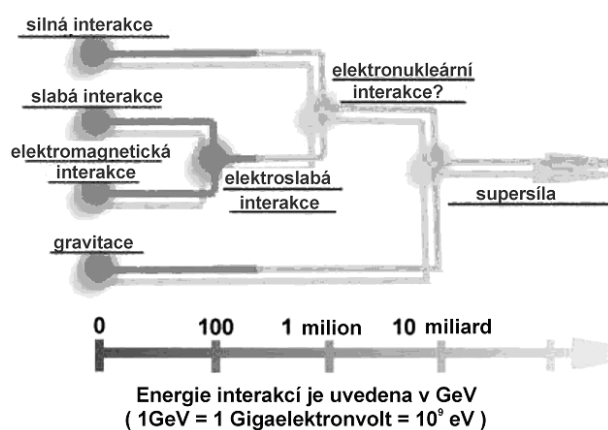
Základní interakce

Všechny síly působící mezi hmotnými objekty jsou důsledkem základních fyzikálních interakcí.

Přehled interakcí:

Tabulka 9 Přehled interakcí

Název interakce	Relativní velikost	Úměrnost	Dosah
silná	10^{38}	$1/r^7$	10^{-15} m
elektromagnetická	10^{36}	$1/r^2$	∞
slabá	10^{25}	$1/r^5$ až $1/r^7$	10^{-18} m
gravitační	10^0	$1/r^2$	∞



Obr. 16 Interakce e energie

Uvedené interakce popisují všechny typy vzájemného působení částic, objektů, polí, jak v mikroskopických rozměrech, tak v makrosvětě. Jak bylo zmíněno, elektromagnetická a slabá interakce by byla sjednocena v rámci teorie elektroslabé interakce. V teorii velkého sjednocení byla sjednocena elektroslabá a silná interakce. Výjimku tvoří gravitační interakce, její možnost začlenění a tím sjednocení všech čtyř interakcí je jedním z aktuálních problémů fyziky.

Interakce těles, jak jsou popisovány elektromagnetickou, silnou a slabou interakcí, předpokládá interakci prostřednictvím pole (ne přímým dotykem). Kvantová teorie pole vysvětluje působení zprostředkované částicemi, tzv. intermediální částice.

Gravitace

Gravitace je nejslabší interakce, ale její dosah je největší. Její velikost klesá s druhou mocninou vzdálenosti, je univerzální, působí na všechna tělesa a částice a energie. Nezávisí na znaménku elektrického náboje, a proto nemůže být vyrušena opačným nábojem. Závisí přímo úměrně na hmotnosti tělesa. Závisí také na rozložení hmotnosti v prostoru. Prostřednictvím gravitace na sebe působí tělesa ve velkých vzdálenostech. V nekonečné vzdálenosti klesá velikost gravitace na nulu.

Gravitace vysvětluje, proč těleso padá k zemi, jak vypadá oběžná dráha planety, existenci černých děr. Gravitace byla popsána matematicky Isaacem Newtonem. Ten formuloval dnes tzv. Newtonův gravitační zákon. Na počátku 20. století (1916) Albert Einstein popsal gravitaci pomocí zakřivení časoprostoru, když formuloval obecnou teorii relativity.

Dalším krokem k vysvětlení gravitace v současné fyzice by měla být teorie kvantové gravitace, která představuje sjednocení obecné teorie relativity s kvantovou mechanikou. Částice, které zprostředkovávají gravitační interakci, jsou tzv. gravitony. Tato teorie je však formulována jen teoreticky, experimentální důkaz gravitonů dosud chybí.

Vzhledem k vlastnostem gravitačního působení v mikroskopických měřítkách u elementárních částic gravitace nemá vliv na pohyb částic, můžeme ji tedy zanedbat. U velkých objektů je tomu naopak, což je dáno velkou hmotností těchto objektů (planety, galaxie). Gravitace není kompenzována, protože neexistuje záporná (gravitační) hmotnost, resp. tzv. antigravitace.

Elektromagnetická interakce

Předpokladem existence je nenulový elektrický náboj objektů popř. existence magnetického momentu. Podobně jako u gravitace, klesá její intenzita se vzdáleností a pro nekonečnou vzdálenost je její hodnota nulová. Neuplatňuje se v megakosmu, a to v důsledku existence dvojího druhu náboje. Nejdříve byla popsána elektrostatická síla, která působí na náboje v klidu, teprve později byly popsány elektromagnetické interakce mezi pohybujícími se náboji. Popis představil koncem 19. století Maxwell – Maxwellovy rovnice. Tvoří popis elektromagnetické interakce v rámci klasické relativistické i nerelativistické fyziky. Kvantový popis představuje kvantová elektrodynamika, která popisuje uvedené silové působení pomocí výměny fotonů.

Základním zákonem elektrostatiky je Coulombův zákon, který je analogií Newtonova gravitačního zákona.

Elektromagnetická interakce má největší škálu projevů (např. zajišťuje soudržnost atomů, projevuje se významně ve formě různých typů chemické vazby aj.).

Elektromagnetická interakce byla sjednocena se slabou interakcí v rámci teorie elektroslabé interakce.

Slabá interakce

Je odpovědná např. za rozpad beta. Působí na všechny leptony a kvarky, a také na neutrino. Je univerzální pro všechny typy elementárních částic. Je zprostředkována intermediálními bosony (W^+ , W^- , Z). Existence intermediálních bosonů byla potvrzeny experimentálně v roce 1983. Oproti všem ostatním třem typům interakcí nevytváří žádné stabilní vázané systémy částic, projevuje se jen rozpadem elementárních částic. Její dosah je 10^{18} m. Při rozpadech elementárních částic dochází často k narušení symetrie, popř. porušení některých zákonů zachování (zákon zachování izospinu, podivnosti, hypernáboje, půvabu, zachování parity, inverze času).

Intermediální bosony mají spinové kvantové číslo 1, na rozdíl od fotonu mají nenulovou klidovou hmotnost. Jsou to těžké částice, např. hmotnost W odpovídá hmotnosti jádra rubidia. Na rozpracování teorie intermediálních bosonů se podíleli S. Weinberg a A. Salam v letech 1967–68, matematické základy nové teorie vybudoval v roce 1971 holandský fyzik G. Hooft. Experimentální ověření proběhlo v roce 1983 v CERNu (Evropské středisko pro jaderný vý-

zkum). Vědecké týmy byly vedeny C. Rubbiou a P. Darriulatem. C. Rubbia a S. van der Meer získali za objev Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1984. Částice W byly identifikovány podle rozpadu na elektron a neutrino, částice Z podle rozpadu buď na pár elektron-pozitron nebo mion-antimion.

Silná interakce

Zajišťuje vazbu kvarků a nukleonů v jádrech atomů. Je zprostředkována gluony. Sílu interakce dokládá to, že překoná i odpudivou sílu dvou souhlasně nabitých protonů v jádře, které jsou odpuzovány elektromagnetickou silou. Pomocí silné interakce reagují jen hadrony. Dosah silné interakce je 10^{-15} m.

Mezi kvarky je dosah silné interakce nekonečný. Hovoříme o tzv. asymptotické volnosti – pro vzdálenosti větší než je lineární rozměr hadronu přitažlivá síla roste na „neomezenou hodnotu“, v těsné blízkosti je malá.

Někdy se silná interakce nepřesně ztotožňuje s pojmem jaderné interakce (viz jaderné síly), což má historické důvody. Poprvé se fyzikové s projevy této interakce setkali v atomovém jádře. Z dnešního pohledu je základní fyzikální interakcí silná interakce mezi kvarky. Silná interakce mezi hadrony a tedy i jaderné síly jsou pouze tzv. zbytkovým projevem této silné interakce mezi kvarky uvnitř hadronů (nukleonů v případě jaderných sil).

„Standardní model je spojení teorie kvantové mechaniky tří základních sil – elektromagnetické, slabé a silné. Prozatím není žádná přijatelná teorie kvantové gravitace. Hledání přijatelné teorie kvantové gravitace a kvantové mechanické teorie velkého sjednocení je důležitou oblastí fyzikálního výzkumu. Dokud se tak nestane, nelze na gravitaci nahlížet jako na sílu, neboť pokud je nahlížena jako zakřivení časoprostoru, je povahy geometrické a nikoli dynamické.

Čas od času je předpovídána pátá interakce, většinou jako vysvětlení rozporu mezi naměřenou a předpokládanou velikostí kosmologické konstanty. Jejich rozdíl je asi největším rozdílem mezi teoretickou a naměřenou hodnotou ve fyzice, činí celých 120 řádů. Vysvětlení se zatím nenašlo. (<http://aldebaran.cz/astrofyzika/interakce/particles.html#Inter>)

Kvarky

Podle současných představ jsou kvarky elementární částice bez vnitřní struktury, z nichž jsou složeny hadrony. Je známo šest typů (tzv. vůní) kvarků, jež se označují jako *u* (z angl. up = horní), *d* (down = dolní), *s* (strange = podivný), *c* (charmed = půvabný), *b* (bottom = spodní, nejnižší), *t* (top = nejvyšší). Iniciála *b* se někdy (dnes již ale zřídka) spojuje také s označením „beauty“ (krása). Kvarky nesou zlomkové elektrické náboje ($+2/3$ pro *u*, *c*, *t* a $-1/3$ pro *d*, *s*, *b*, v jednotkách kladného elementárního náboje) a mají spin $1/2$. Pokud jde o jejich hmotnosti, viz tabulku elementárních částic. Pro objasnění charakteristik pozorovaných hadronů bylo třeba zavést další kvantové číslo kvarků nazývané barva (barevný náboj): každý typ kvarku se může vyskytovat ve třech barevných stavech, které mají stejnou hmotnost. Mezi kvarky působí silná interakce, která je zprostředkována výměnou barevných gluonů (gluonových barev je celkem osm). Za běžných podmínek jsou kvarky i gluony uvnitř hadronů permanentně uvězněny a nemohou být tedy pozorovány jako volné částice; samotné hadrony jsou bezbarvé (neboli barevně neutrální) objekty.

Všeobecně se má za to, že při vysokých teplotách a hustotách hadronové hmoty (charakteristických např. pro vysokoenergetické srážky těžkých atomových jader) může dojít k fázovému přechodu, při němž se hadrony „roztaví“ a vznikne stav nazývaný kvark-gluonová plazma.

Teorie silných interakcí kvarků a gluonů se nazývá kvantová chromodynamika. Mezi kvarky ovšem působí i slabé a elektromagnetické síly, popsané standardním modelem elektroslabých interakcí. Kvarky zavedl do fyziky částic Murray Gell-Mann v roce 1964, jako jednoduchý a názorný fyzikální základ systematiky pozorovaných hadronů. Tento poněkud bizarní název je převzat z jedné pasáže románu Jamese Joyce *Finnegans Wake*. Gell-Mann postuloval tři kvarky u , d a s , které v šedesátých letech stačily k popisu spektra známých mezonů a baryonů.

Na začátku sedmdesátých let se však ukázalo, že vnitřní konzistence teorie elektroslabých interakcí vyžaduje existenci čtvrtého kvarku c . Hadrony obsahující kvark c byly skutečně objeveny o několik let později (jako první mezon J/ψ a jeho excitované stavy v roce 1974). V roce 1977 přibyl pátý kvark b , konstituent mezonu Y a jemu příbuzných hadronů. Struktura standardního modelu pak jednoznačně vyžadovala existenci šestého kvarku t (podobně jako tomu bylo předtím v případě předpovědi c). Top-kvark t byl poprvé pozorován v roce 1994 a jeho objev byl definitivně potvrzen o rok později. Je nejtěžší známou elementární částicí – jeho klidová energie 175 GeV zhruba odpovídá např. hmotnosti atomu wolframu. Prakticky vždy se rozpadá na b -kvark a intermediální boson W (na základě tohoto rozpadu byl také detekován) a žije velmi krátce, řádově 10^{-25} s. Z tohoto důvodu zřejmě nebudou nikdy pozorovány jeho vázané stavy, neboť typická doba potřebná pro vznik hadronu je nejméně o dva řády větší.

Pro srovnání, střední doba života b -kvarku je zhruba 10^{-13} s.

Tabulka 10 Elementární částice standardního modelu

(<http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/~horejsi/popular/elementary.html>)

Elementární částice standardního modelu mikrosvěta				
Název	Symbol	Klidová energie (GeV)	Elektrický náboj	Spin
u-kvark	u	0,0015 – 0,005	+ 2/3	1/2
d-kvark	d	0,003 – 0,009	– 1/3	1/2
s-kvark	s	0,06 – 0,17	– 1/3	1/2
c-kvark	c	1,1 – 1,4	+ 2/3	1/2
b-kvark	b	4,1 – 4,4	– 1/3	1/2
t-kvark (top-kvark)	t	175	+ 2/3	1/2
elektron	e	0,0005	– 1	1/2
mion	μ	0,105	– 1	1/2
tau-lepton	τ	1,777	– 1	1/2
elektronové neutrino	ν_e	$< 5 \cdot 10^{-9}$	0	1/2
mionové neutrino	ν_μ	$< 0,0002$	0	1/2
tau-neutrino	ν_τ	$< 0,018$	0	1/2

nabýlý intermediální boson (W-boson)	W^+, W^-	80	+ 1, - 1	1
neutrální intermediální boson (Z-boson)	Z^0	91	0	1
foton	γ	0	0	1
gluon	g	0	0	1
Higgsův boson	H	$125 < 127$	0	0

V rámci současného standardního modelu mikrosvětla tvoří systém elementárních částic (viz tabulku 10).

Kvantová chromodynamika

Model kvantové teorie pole popisující silné interakce kvarků. Místo plného názvu se i v české literatuře často užívá zkratka QCD převzatá z angličtiny. Zhruba od roku 1973 je QCD součástí standardního modelu fundamentálních interakcí (spolu s teorií elektroslabých sil) a dává hlubší teoretický základ kvarkovému modelu hadronů i partonovému modelu srážek částic při vysokých energiích. Podle kvantové chromodynamiky je nositelem silné interakce osm gluonů, které „přenášejí“ barvu (barevný náboj) kvarků, ale interagují i samy se sebou. Matematická formulace QCD je podobná jako v případě kvantové elektrodynamiky, přičemž barva je protějškem elektrického náboje a gluony hrají roli „barevných fotonů“ (odtud i sám název, z řeckého *chromos* = barevný). Stejně jako kvarky nejsou gluony pozorovány volné, prokázány jsou však nepřímo (shodou předpovědí kvarkové teorie s experimentem). Gluony nesou barvu, nemají elektrický náboj.

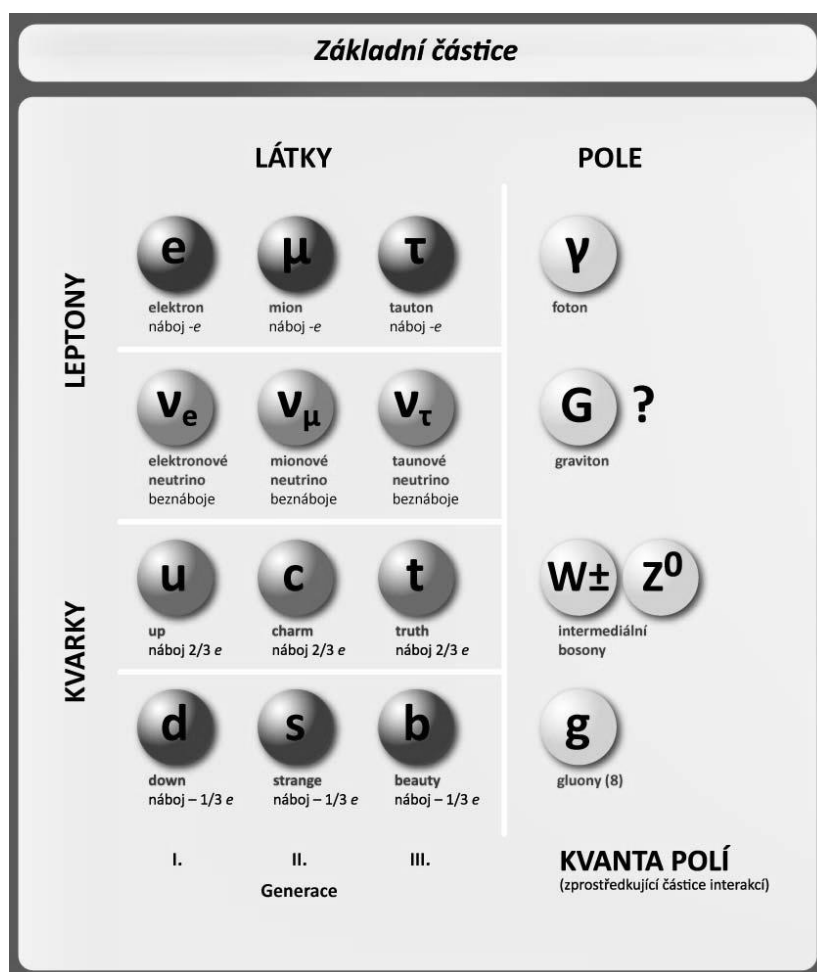
Chromodynamika poskytuje silné argumenty ve prospěch permanentního uvěznění kvarků a gluonů v hadronech, ačkoli přesný důkaz dosud nebyl proveden. Jinou pozoruhodnou vlastností QCD, kterou se podstatně liší od elektrodynamiky, je tzv. asymptotická volnost – na velmi malých vzdálenostech síla působící mezi kvarky a gluony vymizí. To znamená, že elementární konstituenty hadronů, na velkých vzdálenostech podstatně ovlivňované věžnicí silou, se v těsné vzájemné blízkosti chovají prakticky jako volné částice. Toto chování lze testovat ve vysokoenergetických srážkách částic (např. leptonů a hadronů), při nichž se předává velká hybnost (tzv. „tvrdé procesy“). Teoretické předpovědi QCD týkající se asymptotické volnosti byly ověřeny v mnoha nezávislých experimentech.

Tabulka 11 Zákony zachování pro interakce

Veličina	Interakce			
	gravitační	elektromagnetická	slabá	silná
energie	+	+	+	+
hybnost	+	+	+	+
moment hybnosti	+	+	+	+
elektrický náboj	+	+	+	+
leptonové číslo	+	+	+	+

baryonové číslo	+	+	+	+
podivnost	+	+	-	+
izospin	+	+	-	-
složka izospinu I ₃	+	+	-	+
vůně	+	+	-	+
hypernáboj	+	+	-	+

Přehled základních částic



Obr. 17 Elementární částice
http://artemis.osu.cz/mmfiz/jm/jm_2_4_5.htm

Tento systém představuje jeden z úspěchů ve snahách o jednotný pohled na svět.

POLE

Jedna ze dvou forem hmoty. Pole a jeho vlastnosti lze popsat pomocí fyzikálních veličin. Matematický popis pole a chápání pole v matematickém smyslu je systém, kde každému bodu prostoru je přiřazena hodnota fyzikální veličiny. Pojem pole poprvé zavedl Faraday v oblasti elektromagnetických jevů. Fyzikální pole je stav určité fyzikální veličiny v prostorové oblasti Ω v časovém intervalu τ .

Matematický popis pole

Pole představuje funkci, tato funkce může být skalární, vektorová, tenzorová. Tato funkce nemusí, ale může přímo souviset se sledovanou fyzikální veličinou.

Klasická pole – funkce souvisí se sledovanou veličinou (teplota). Pracujeme s Eukleidovským prostorem (třírozměrný prostor a systém souřadnic x, y, z) a čas. Speciální teorie relativity používá Minkowského prostoročas, obecná teorie relativity pracuje se zakřiveným prostoročasem.

Kvantová pole – popisujeme pomocí operátorů. Každému bodu prostoru je přiřazen operátor (Hamiltonův operátor).

Podle charakteru veličiny rozlišujeme pole

- skalární
- vektorové
- tenzorové
- spinorové

Popis pomocí pole v klasické fyzice

- Mechanika kontinua (pole tenzoru deformace, pole rychlostí). Pole je prostředek k popisu kontinua.
- Popis elektrického pole
- Maxwellova teorie elektromagnetického pole
- Newtonova teorie gravitace (gravitační pole)

Kvantové pole

V rámci kvantové teorie pole – Klein-Gordonovo pole, Diracovo pole

Další rozdělení polí – konzervativní (potenciální) a nekonzervativní (pole disipativních sil).

Skalární pole

Hodnota fyzikální veličiny, která je přiřazena každému bodu prostoru, je skalár. V kartézské soustavě souřadnic lze polohu každého bodu určit pomocí polohového vektoru $\vec{r} = \vec{i}x + \vec{j}y + \vec{k}z$. Skalární pole fyzikální veličiny f lze vyjádřit jako funkci tohoto polohového vektoru \vec{r} nebo jaké funkci souřadnic x, y, z , tj.

$$f = f(\vec{r}) = f(x, y, z) \quad (40)$$

Závisí-li pole jen na souřadnicích a nikoli na čase, jde o pole stacionární. Jsou-li pole časově proměnná, tzn. $f(x, y, z, t)$, jde o pole nestacionární.

Příklady skalárních polí: rozložení teploty v místnosti, hustota náboje v tělese.

Tečna ke křivce – pomáhá vyšetřovat vlastnosti pole podél určité křivky. Předpokládáme, že bod A se pohybuje po křivce l od nějakého pevného bodu O . Pro polohový vektor bodu A platí, že svírá se souřadnými osami úhly α, β, γ a pro směrové kosiny lze psát

$$\cos \alpha = \frac{x}{r}, \cos \beta = \frac{y}{r}, \cos \gamma = \frac{z}{r},$$

přičemž

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1. \quad (41)$$

Pokud se bod A bude přibližovat neomezeně k bodu O , potom dostaneme

$$d\vec{r} = \vec{i} dx + \vec{j} dy + \vec{k} dz,$$

a jednotkový tečný vektor

$$\vec{t} = \vec{i} \cos \alpha + \vec{j} \cos \beta + \vec{k} \cos \gamma.$$

Hodnota fyzikální veličiny se ve skalárním poli mění, ale v některých bodech zůstává stejná a má konstantní hodnotu f_k . Tyto hodnoty tvoří plochu, tzv. ekviskalární (ekvipotenciální) o rovnici $f(x, y, z) = f_k = \text{konst.}$

Každým bodem skalárního pole prochází jediná ekviskalární plocha, tzn. dvě různé hladiny se nikde neprotínají.

Model skalárního pole – grafické znázornění – ekvidistantní hladiny se stejnými rozdíly mezi jednotlivými hladinami.

Gradient skalárního pole – grad:

$$\vec{f} = \vec{i} \frac{\partial f}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial f}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial f}{\partial z} = \frac{df}{dn} \vec{n} \quad (42)$$

- Gradient skalárního pole je v každém bodě kolmý k hladině, která tímto bodem prochází.
- Ve směru gradientu roste skalární pole nejrychleji.
- Maximum rychlosti růstu skalárního pole má velikost $|v| = |\text{grad } f|$

Výraz $\text{grad } f$ je vektor. Tzn. že uvedená operace přiřazuje skalárnímu poli f vektorové pole $\vec{F} = \text{grad } f$. Toto přiřazení je jednoznačné. Skalární pole f je skalárním potenciálem vektorového pole \vec{F} . Zpětné přiřazení již jednoznačné není (skalární pole f a pole $f + c$, kde c je konstantní skalární pole, mají stejný gradient).

Vektorové pole

Každému bodu uvažované oblasti Ω je jednoznačně přiřazena vektorová veličina

$$\vec{F} = \vec{i} F_x + \vec{j} F_y + \vec{k} F_z.$$

Příklady vektorového pole – pole vektoru elektrické intenzity, magnetické indukce, pole rychlosti molekul proudící kapaliny.

Model vektorového pole – grafické znázornění pomocí vektorových čar (orientované křivky), které mají tyto vlastnosti:

- Každým bodem vektorového pole prochází jediná vektorová čára. Vektorové čáry se nikde neprotínají.
- Vektorové čáry vystihují směr vektorů \vec{F} v různých bodech pole, nevystihují však jejich velikost $|\vec{F}|$.
- Pro přehlednost se zakreslují jen některé vektorové čáry. Úmluva – podle hustoty čar lze usuzovat na velikost $|\vec{F}|$ v daném místě pole. Zavádíme veličinu, která vystihuje počet vektorových čar, které procházejí jednotkovou plochou kolmou ke směru čar, tzv. tok vektorového pole plochou S :

$$d\Phi = |\vec{F}| dS_{\perp},$$

obecně

$$d\Phi = |\vec{F}| dS \cos \alpha, \quad (43)$$

kde α je úhel, který svírá jednotkový vektor normály se směrem vektoru \vec{F} .

Dále platí (pokud stanovíme směr oběhu po obvodu plošky dS : $d\vec{S} = \vec{n}dS$, že tok pole tímto elementem je $d\Phi = \vec{F} \cdot d\vec{S}$.

Tok uzavřenou plochou S , která ohraničuje objem V (normála je orientována směrem ven z objemu)

$$\Phi = \oint_S \vec{F} \cdot d\vec{S}. \quad (44)$$

Zmenšujeme-li uzavřenou plochu kolem bodu A dostaneme tzv. divergenci pole \vec{F} v bodě A :

$$d\Phi = \text{div}\vec{F} \cdot dV, \quad (45)$$

odtud

$$\Phi = \int_V \text{div}\vec{F} dV. \quad (46)$$

Porovnáním dostaneme Gaussovu větu

$$\oint_S \vec{F} \cdot d\vec{S} = \int_V \text{div}\vec{F} dV. \quad (47)$$

Přímý výpočet divergence:

$$\text{div}\vec{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \quad (48)$$

Divergence vektorového pole \vec{F} jednoznačně přiřazuje tomuto poli skalární pole f , kde

$$f = \text{div} \vec{F}.$$

Klasifikace vektorových polí podle hodnot divergence:

- $\operatorname{div} \vec{F} > 0$... pole s kladným nábojem
- $\operatorname{div} \vec{F} < 0$... pole se záporným nábojem
- $\operatorname{div} \vec{F} = 0$... pole bezzdrojové (solenoidální)

Rotace

Stokesova věta: cirkulace vektorového pole podél uzavřené křivky l je rovna celkovému toku rotace pole libovolnou plochou S , pro niž křivka l představuje hranici:

$$\oint_l \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int_S \operatorname{rot} \vec{F} \cdot d\vec{S} \quad (49)$$

Přímý výpočet rotace

$$\operatorname{rot} \vec{F} = \vec{i} \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) + \vec{j} \left(\frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) + \vec{k} \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right). \quad (50)$$

Příklady rotace – vznik vírů, rotace tuhého tělesa kolem pevné osy $\vec{\omega} = \frac{1}{2} \operatorname{rot} \vec{v}$.

Vektorové pole, pro které v celém definičním oboru platí, že $\operatorname{rot} \vec{F} = 0$, je pole nevírové.

Vektorové pole \vec{F} , které je možno vyjádřit jako rotaci nějakého nenulového vektorového pole \vec{G} , tj. platí $\vec{F} = \operatorname{rot} \vec{G}$, je tzv. solenoidální (bezzdrojové).

Je-li \vec{F} potenciální vektorové pole, pak je nevírové: $\operatorname{rot} \vec{F} = \operatorname{rot} \operatorname{grad} f = \vec{0}$ (siločáry potenciálního pole nesmějí vytvářet víry).

Zkoumejme vlastnosti pole, pro které

$\operatorname{rot} \vec{a} = 0$: $\vec{a} = \operatorname{grad} V$... vektorové pole lze vyjádřit jako gradient skalárního pole V , pole V je skalární potenciál vektorového pole \vec{a}

$\operatorname{div} \vec{a} = 0$: $\vec{a} = \operatorname{rot} \vec{A}$... vektorové pole lze vyjádřit jako rotaci jiného vektorového pole, \vec{A} je vektorový potenciál vektorového pole \vec{a} .

Pozn. Skalární potenciál je určen až na konstantu, vektorový potenciál je určen až na gradient libovolné skalární funkce.

Aplikace diferenciálních operátorů

Mechanika tekutin:

$\operatorname{rot} \vec{v} = 0$ proudění nevírové, $\vec{v} = \operatorname{grad} f$, kde funkce f je rychlostní potenciál, proudění kapaliny je potenciálové

obecná rovnice kontinuity $\operatorname{div} \rho \cdot \vec{v} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, v případě ideální kapaliny je hustota konstantní,

tedy $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, odtud po vydělení ρ máme $\operatorname{div} \vec{v} = 0$ což je rovnice kontinuity ideální kapaliny.

Elektrostatické pole:

Poissonova rovnice $\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$... potenciál elektrostatického pole s nenulovou objemovou hustotou náboje.

Laplaceova rovnice $\Delta\varphi = 0$... platí pro body, kde $\rho = 0$.

Gaussův zákon pro obecné elektrostatické pole $\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$... náboje s objemovou hustotou ρ jsou zdrojem siločar elektrického pole, jejichž směr je určen hodnotou divergence intenzity \vec{E} v daném bodě. Je-li kladná, siločáry z daného bodu vystupují.

Pole v přítomnosti dielektrika – použijeme elektrickou indukci \vec{D} : $\operatorname{div} \vec{D} = \rho$

Elektromagnetické pole – Maxwellovy rovnice (Gaussův zákon, Ampérův zákon zobecněný na případ celkového, nestacionárního proudu, Faradayův zákon elektromagnetické indukce, zákon o neexistenci magnetických nábojů):

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

Obecně má tato soustava nekonečně mnoho řešení, je třeba doplnit počáteční a okrajové podmínky.

Rovnice kontinuity proudu $\operatorname{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$... obecná rovnice, kde \vec{j} je proudová hustota, ρ je hustota náboje, t je čas. Jde o matematické vyjádření zákona zachování náboje (náboj nikde nevzniká ani nezaniká).

Rovnice kontinuity pro stacionární proud: $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, $\operatorname{div} \vec{j} = 0$, kde $\vec{j} = \rho \vec{v}$ (náboj o hustotě ρ se pohybuje rychlostí \vec{v}) → analogie s rovnicí kontinuity v mechanice kapalin.

Konzervativní silová pole

Práce síly, vykonaná v tomto poli, závisí jen na konečné a počáteční poloze tělesa. Jestliže se těleso přemísťuje po uzavřené křivce, je celková práce nulová:

$$W = \oint_l \vec{F} \cdot d\vec{r} = 0 \quad (51)$$

Příklady: gravitační pole, elastická síla

Vlastnosti: jsou potenciálová – intenzitu pole vyjadřujeme pomocí gradientu skalární funkce (potenciál pole), jsou stacionární (síla ani potenciál pole nezávisí na čase).

Tělesa v poli konzervativních sil, mají potenciální energii. Pro konzervativní pole platí zákon zachování mechanické energie.

Nekonzervativní síly – tření, odporové síly – závisí na rychlosti pohybu tělesa, dochází k disipaci energie (přeměna energie na teplo), neplatí zákon zachování mechanické energie.

Gyroskopické síly – nekonají práci, nelze je popsat potenciální energií, působí vždy kolmo ke směru pohybu. Příklady – magnetická část Lorenzovy síly (stacionární magnetické pole působí na nabitou částici), Coriolisova síla.

Pole homogenní – veličina má v každém bodě prostoru stejnou hodnotu. V případě homogenního gravitačního pole je veličinou vektor intenzity gravitačního pole. Vektory mají v každém bodě pole stejný směr a jsou rovnoběžné.

Radiální pole (centrální pole) – potenciál pole závisí jen na vzdálenosti r od centra (středu, osu), potenciál je $U(r)$. Síla, která působí v tomto poli, je centrální síla.

Pohyb v poli centrálních sil bývá také označován jako **centrální pohyb** (viz pohyby v centrálním gravitačním poli Země).

ANALOGIE MEZI GRAVITAČNÍM A ELEKTROSTATICKÝM POLEM

Newtonův gravitační zákon

$$\vec{F}_g = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{r}^0, \quad (\vec{r}^0 = \vec{r} / r) \quad (52)$$

se svým tvarem velice podobá jinému fundamentálnímu zákonu klasické fyziky – Coulombovu zákonu elektrostatiky

$$\vec{F}_e = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{r}^0, \quad (53)$$

který vyjadřuje vzájemné silové působení dvou (bodových) elektrických nábojů q_1 a q_2 umístěných ve vakuu ve vzdálenosti r od sebe. Hodnota konstanty k závisí na použité soustavě jednotek. Ve fundamentální fyzice se pokládá $k = 1$ (čímž se přirozeně definuje jednotka elektrického náboje pomocí jeho silového působení na jednotkovou vzdálenost), v soustavě SI je $k = 8,988 \cdot 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$ a jednotkou elektrického náboje je 1 coulomb (C). Coulombův zákon ve tvaru uvedeném výše platí i v elektricky homogenním a izotropním látkovém prostředí, přičemž konstanta úměrnosti k se vyjadřuje ve tvaru $k = 1/4\pi\epsilon$, kde ϵ je permitivita (dielektrická konstanta) daného látkového prostředí.

Historický vývoj fyziky však bohužel vedl k tomu, že v soustavě jednotek SI není náboj primárně kvantifikován pomocí svých elektrických silových účinků, ale až zprostředkovaně pomocí magnetických účinků elektrického proudu (jednotka Ampér; jeden Coulomb je pak definován jako 1A/1s). Kam až sahají analogie mezi elektřinou a gravitací: Newtonův a Coulombův zákon mají zcela stejný tvar, takže hmotnosti m_1 a m_2 dvou gravitujících těles můžeme nazvat jejich „gravitačními náboji“. Všechny závěry o pohybu těles pod vlivem gravitace platí i o pohybech nabitých těles pod vlivem Coulombova elektrostatického pole. I zde se elektrické náboje pohybují po Keplerovských trajektoriích – obíhají po elipsách, přibližují a vzdalují se po hyperbolách nebo parabolách (nepřihlížíme zde zatím k radiačním efektům způsobeným vyzařováním elektromagnetických vln při nerovnoměrném pohybu elektrických nábojů).

Hned zde však narážíme na první důležitý rozdíl. Zatímco elektrické náboje mohou mít kladné i záporné znaménko ($q > = < 0$) a elektrostatická síla mezi nimi může být jak přitažlivá (mezi nesouhlasnými náboji) tak odpudivá (souhlasné náboje), je hmotnost vystupující v Newtonově zákoně vždy kladná (resp. nezáporná $m \geq 0$) a gravitační síla je vždy přitažlivá. Tato fundamentální vlastnost gravitace, která je podle Einsteinových rovnic splněna i v obecné teorii relativity (ve všech fyzikálně reálných situacích, kdy tenzor energie-hybnosti je pozitivně definitní), hraje zásadní roli v takových oblastech jako je fyzika černých děr (2. zákon dynamiky černých děr) nebo kosmologie (teorémy o singularitách).

Stejně jako v elektrostatice je pro vzájemné působení elektrických nábojů užitečné zavést pojem elektrické pole, je i v gravitaci výhodné popisovat vzájemné působení hmotných těles pomocí pojmu gravitační pole. Podle této koncepce každé hmotné těleso vytváří kolem sebe gravitační pole a toto pole pak vykazuje silové účinky na každé další těleso, které se do něho dostane.

Každé fyzikální pole je charakterizováno svým působením na zkušební částice. V elektrostatice jsou zkušebními částicemi elektricky nabitá tělíska, v gravitaci to jsou dostatečně malá tělesa, která svými vlastními účinky znatelně neovlivňují zkoumané gravitační pole a jeho zdroje. Podobně jako elektrostatické pole kvantifikujeme vektorem elektrické intenzity \vec{E}_{el} , což je síla působící na jednotkový zkušební náboj, tj.

$$\vec{F}_{\text{el}} = q \cdot \vec{E}_{\text{el}}. \quad (54)$$

Lze gravitační pole popsat rovněž vektorem intenzity pole \vec{E}_{gr} udávajícím gravitační sílu působící na testovací částici jednotkové hmotnosti, tj.

$$\vec{F}_{\text{gr}} = m \cdot \vec{E}_{\text{gr}}. \quad (55)$$

Coulombův zákon je možno vyjádřit prostřednictvím intenzity elektrického pole \vec{E}_{el} , buzeného v prostoru kolem bodového elektrického náboje Q :

$$\vec{E}_{\text{el}} = kQ / r^2 \cdot \vec{r}^0 \quad (56)$$

Newtonův gravitační zákon pak říká, že bodové těleso hmotnosti M budí kolem sebe centrální gravitační pole o intenzitě

$$\vec{E}_{\text{gr}} = -G \cdot M / r^2 \cdot \vec{r}^0. \quad (57)$$

Skutečnost, že jak elektrostatické, tak gravitativní pole je konzervativní, umožňuje vyjádřit intenzitu pole pomocí skalárního potenciálu φ :

$$\vec{E}_{\text{el}} = -\text{grad } \vec{\varphi}_{\text{el}}, \quad \vec{E}_{\text{gr}} = \text{grad } \vec{\varphi}_{\text{gr}} \quad (58)$$

Pro centrální pole bodového náboje Q nebo tělesa M je

$$\varphi_{\text{el}}(\vec{r}) = k \cdot Q / r, \quad \text{resp.} \quad \varphi_{\text{gr}}(\vec{r}) = -G \cdot M / r. \quad (59)$$

Zkušenost učí, že pro silové působení soustavy většího počtu elektrických nábojů nebo gravitujících těles platí zákon superpozice, podle něhož účinek soustavy objektů (na danou zkušební částici) je roven součtu účinků každého objektu zvlášť, tj. pro soustavu N bodových nábojů nebo hmotných těles bude celková intenzita elektrického nebo gravitačního pole

$$E_{\text{el}}(\vec{r}) = k \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{(\vec{r} - \vec{r}_i)^2} \frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|}, \quad E_{\text{gr}}(\vec{r}) = -G \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{(\vec{r} - \vec{r}_i)^2} \frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|}, \quad (60)$$

a příslušné výsledné potenciály

$$\varphi_{\text{el}}(\vec{r}) = k \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|}, \quad \varphi_{\text{gr}}(\vec{r}) = -G \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|}, \quad (61)$$

kde \vec{r} je polohový vektor bodu, v němž pole určujeme, a \vec{r}_i jsou polohové vektory jednotlivých bodových nábojů q_i nebo těles m_i .

Pozdější rozvoj učení o gravitaci však ukázal, že zde se skrývá druhý podstatný rozdíl mezi gravitací a elektřinou. Pro elektromagnetické jevy platí princip superpozice naprosto přesně i pro sebevětší náboje a sebesilnější pole. Pro gravitaci ale platí princip superpozice s dostatečnou přesností skutečně pouze v rámci Newtonova zákona, zatímco pro velká nahromadění hmoty a silná gravitační pole již splněn není. Tato nelinearita souvisí s univerzálností gravitační interakce.

Stejně jako je mnohdy užitečné místo soustavy velkého počtu diskretních elektrických nábojů uvažovat spojité rozložení elektrického náboje s prostorovou hustotou $\rho_{\text{el}} = dQ/dV$, tj. náboj Q obsažený v dané prostorové oblasti V vyjadřovat ve tvaru

$$Q = \iiint_V \rho_{\text{el}}(x, y, z) dV, \quad (62)$$

zavádí se běžně v mechanice a gravitaci hustota spojitě rozloženého hmotnosti $\rho = dm/dV$, takže celková hmotnost M obsažená v prostorové oblasti V je pak vyjádřena integrálem

$$M = \iiint_V \rho(x, y, z) dV. \quad (63)$$

Souvislost mezi modelem soustavy bodových nábojů q_i a představou kontinuálního rozložení náboje se vyjadřuje pomocí Diracovy δ -funkce: $\rho_{\text{el}}(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N q_i \delta(\vec{r} - \vec{r}_i)$. Analogicky vztah platí pro hmotnost. Pro spojité rozložený náboj s hustotou $\rho_{\text{el}}(\vec{r})$ nebo pro spojité rozloženou hmotu s hustotou $\rho(\vec{r})$ pak vzhledem k principu superpozice výsledné elektrické nebo gravitační pole bude

$$\vec{E}_{\text{el}}(\vec{r}) = k \iiint \frac{\rho_{\text{el}}(\vec{r}')}{(\vec{r} - \vec{r}')^2} \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV', \quad \vec{E}_{\text{gr}}(\vec{r}) = -G \iiint \frac{\rho(\vec{r}')}{(\vec{r} - \vec{r}')^2} \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV', \quad (64)$$

$$\varphi_{\text{el}}(\vec{r}) = k \iiint \frac{\rho_{\text{el}}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV, \quad \varphi_{\text{gr}}(\vec{r}) = -G \iiint \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV, \quad (65)$$

kde \vec{r}' je polohový vektor integračního objemového elementu dV' .

Coulombův i Newtonův zákon se dají formulovat ve tvaru Gaussovy věty

$$\oiint_S \vec{E}_{\text{el}} d\vec{S} = 4\pi k Q, \quad \oiint_S \vec{E}_{\text{gr}} d\vec{S} = -4\pi G M, \quad (66)$$

podle níž tok vektoru intenzity pole \vec{E} přes uzavřenou plochu S je dán celkovým nábojem Q , resp. celkovou hmotností M , obsaženou uvnitř této plochy. Vyjádřením náboje a hmotnosti pomocí integrálů jejich hustoty a užitím Gaussovy věty vektorové analýzy lze vztahy přepsat v diferenciálním tvaru

$$\text{div } \vec{E}_{\text{el}} = 4\pi k \rho_{\text{el}}, \quad \text{div } \vec{E}_{\text{gr}} = -4\pi G \rho, \quad (67)$$

který říká, že výtok vektoru intenzity pole z jednotkového objemu je dán místní hustotou náboje nebo hmotnosti. Vyjádřením intenzity pole pomocí gradientu potenciálu vznikne Poissonova diferenciální rovnice druhého řádu pro potenciál

$$\Delta \varphi_{\text{el}} = -4\pi k \rho_{\text{el}}, \quad \Delta \varphi_{\text{gr}} = 4\pi G \rho, \quad (68)$$

kde $\Delta \equiv \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$ je Laplaceův diferenciální operátor.

Newtonova rovnice pohybu tělesa o hmotnosti m a elektrickém náboji q v elektrickém poli má tvar

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \frac{q}{m} \cdot \text{grad } \varphi_{\text{gr}}, \quad (69)$$

zatímco při pohybu v gravitačním poli se hmotnost na obou stranách vykrátí (rovnost gravitační a setrvačné hmotnosti):

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \text{grad}\vec{\varphi}_{\text{gr}} \quad (70)$$

Zásadní rozdíl mezi pohybem v elektrickém a v gravitačním poli spočívá v tom, že v elektrickém poli se různá tělesa pohybují různě podle hodnoty svého specifického náboje q/m , zatímco v gravitačním poli trajektorie tělesa nezávisí na žádných individuálních charakteristikách pohybujícího se tělesa – je univerzální vlastností pouze samotného pole $\varphi_{\text{gr}}(\vec{r})$. Pohybová rovnice je tak vyjádřením univerzálnosti gravitačního působení.

Chceme-li sjednotit tato pole do jednoho unitárního pole, můžeme z hlediska vztahu prostoru a pole postupovat v zásadě dvěma způsoby:

„Fyzikální přístup“:

Složitě pole v jednoduchém prostoru.

Jednotný popis různých polí lze provést tak, že z jejich popisujících fyzikálních veličin sestavíme (vhodně „zkombinujeme“) jednu složitější a obecnější veličinu, jejíž distribuci ve stávajícím prostoru prohlásíme za unitární pole. Složitější matematická struktura veličiny popisující unitární pole vede ke složitějšímu dynamickému chování polních veličin, modelující různá pole odpovídající jednotlivým interakcím. Energetické excitace a vibrace (oscilace) různých komponent unitárního pole efektivně vytvářejí v rámci koncepce kvantové teorie pole různé druhy elementárních částic – kvant jednotlivých druhů polí. Vlastnosti samotného prostoru jsou přitom ponechány beze změny. Takto se přistupuje k unitarizaci interakcí v rámci fyziky elementárních částic – Weinbergova-Salamova-Glashowova elektro-slabá interakce a „velké sjednocení“ (GUT), tvořící nyní základ standardního modelu elementárních částic, jakož i supergravitační teorie.

„Geometrický přístup“:

Jednoduché pole ve složitém prostoru.

Alternativní přístup zavádí určité poměrně jednoduché výchozí pole a složitost a různorodost jednotlivých druhů polí vyjadřuje pomocí složitějších vlastností samotného prostoru, v němž je výchozí pole distribuováno. Různé vlastnosti chování a šíření základního pole v jednotlivých geometrických strukturách v každém bodě modelují různé vlastnosti jednotlivých výsledných dílčích polí.

Nejobvyklejší takové zobecnění geometrických vlastností prostoru spočívá v zavedení dalších rozměrů – „extra-dimenzí“ – prostoru. Jedná se o vícedimenzionální unitární teorie. Základní námitka proti existenci těmto dalším rozměrů spočívá v tom, že žádnými pozorováními ani experimenty nebyly nikdy pozorovány. Tato námitka se řeší koncepcí tzv. kompaktifikace příslušných dimenzí – ve směru těchto dimenzí je prostor topologicky „svinut“, „zkroucen“ či „srolován“ do kružnicového tvaru tak nepatrné délky, že makroskopickými (a ani dosavadními mikroskopickými) metodami je nemůžeme pozorovat či detekovat. Vedle vnějšího třírozměrného prostoru, který můžeme pozorovat a který známe ze zkušenosti, je ve vícedimenzionálních teoriích skrytý přítomen i vnitřní prostor stočených dimenzí.

Tyto vnitřní extra-dimenze jsou imanentně přítomné v každém bodě prostoru. Výchozí pole se pak lokálně může distribuovat nejen v obvyklých třech prostorových rozměrech, ale i ve směru dodatečných vnitřních dimenzí. V rámci kvantové teorie pole lokální excitace a oscilace výchozího pole ve směrech jednotlivých vnitřních extra-dimenzí, lišících se geometrickými vlastnostmi (např. symetriemi) efektivně vytvářejí různé druhy elementárních částic. Vlast-

nosti polí, které pozorujeme, tak závisí na geometrických vlastnostech dalších, skrytých extra-dimenzí. Různé geometrie dodatečných dimenzí implikují různé druhy částic a sil, což v makroskopickém světě vyvolává odlišné fyzikální jevy – různorodost jednotlivých druhů interakcí.

Skutečně obecné a fundamentální přírodní zákony tak platí v rámci úplného vícerozměrného prostoru, my zde pozorujeme jen jejich určité trojrozměrné projekce či „stínové obrazy“ ve vnějším prostoru.

Oba tyto způsoby mohou být do určité míry ekvivalentní, avšak existence velmi propracovaného matematického aparátu diferenciální geometrie a topologie variet upřednostňuje druhý přístup, který bude níže aplikován na geometrické formulace supergravitace a na teorii superstrun.

SYMETRIE A ZÁKONY ZACHOVÁNÍ

Ve fyzice se pod symetrií určitého fyzikálního systému rozumí neměnnost (invariance) důležitých vlastností tohoto systému při transformacích proměnných veličin, které jej popisují. Velmi důležitou úlohu zde mají především symetrie pohybových rovnic, popisujících dynamiku systému, vůči transformacím jejich proměnných. Tedy takové transformace veličin popisujících daný fyzikální systém, které ponechávají tvar pohybových rovnic tohoto systému beze změn. Tyto symetrie pak mohou (ale nemusí) vykazovat i řešení těchto rovnic. Rovnice popisující dynamiku systému mají určité symetrie, avšak výsledný stav systému, který je řešením těchto rovnic, tuto symetrii nerespektuje – např. v důsledku nesymetrických počátečních podmínek.

Prvním důležitým principem symetrie v moderní fyzice byla Lorentzovská invariance, původně objevená jako (víceméně náhodná) matematická vlastnost Maxwellových rovnic odvozených z experimentálně pozorovaných zákonů elektromagnetismu. Tehdejší chod fyzikálních úvah byl zhruba následující:

experiment → rovnice pole → symetrie

Zásluhou A. Einsteina a jeho teorie relativity si fyzikové uvědomili, že principy symetrie mohou být mocným gnoseologickým nástrojem; vzpomeňme si jen, že právě z požadavku symetrie vůči obecným transformacím prostoročasových souřadnic, spolu s principem ekvivalence, vyplynula obecná teorie relativity. Nyní je metodou teoretické fyziky spíše schéma:

principy symetrie → lagrangián → rovnice pole

Fyzikálně odůvodněný požadavek určité symetrie může sloužit jako určitý „konstrukční princip“ či pomůcka při vytváření fyzikálních teorií a modelů. A přítomnost symetrií ve fyzikálních modelech umožňuje vyvozovat některé důležité teoretické předpovědi, aniž musíme znát konkrétní podrobné (a často značně složité) řešení pohybových rovnic. Složením dvou transformací, při kterých se systém nezmění, vzniká rovněž operace zachovávající systém stejný – z matematického hlediska je tedy množina všech symetrií daného systému grupou.

Ve fyzice našly grupy své první uplatnění v krystalografii, kde se pomocí nich vyjadřují vlastnosti symetrie krystalové mřížky pevných látek. V relativistické fyzice se poprvé grupy objevily již v práci H. Poincaré, který ukázal, že transformace prostorových a časových souřadnic mezi inerciálními vztažnými soustavami (které nazval Lorentzovy) tvoří (Lieovu) grupu; tato grupa obecných Lorentzových transformací (nehomogenních, včetně translací) se nazývá Poincarého grupa. Při dalším rozvoji speciální a zvláště obecné teorie relativity se však s použitím grup můžeme setkat jen ojediněle a okrajově. Teorie grup se od konce 20. a začátku 30. let začala více uplatňovat v kvantové mechanice při analýze víceelektronových konfigurací atomů a v kvantové chemii.

Na základě obsáhlého experimentálního materiálu, získaného převážně v 50. a 60. letech při hledání nových elementárních částic, byly vypořádány výrazné symetrie ve vlastnostech elementárních částic, které v r. 1964 vyústily zformulováním kvarkového modelu hadronů, podle něhož jsou všechny hadrony složeny z ještě „elementárnějších“ částic – kvarků (tento název byl přenesen z literárního díla Jamese Joyce). Kvarky jsou přitom fermiony se spinem $1/2$ a třetinovým elektrickým nábojem. Pro vysvětlení systematiky hadronů v rámci aditivního kvarkového modelu bylo postupně zavedeno 6 druhů (v angličtině se používá slovo flavour – „vůně“) kvarků. Z téhož důvodu bylo nutné přiřadit kvarkům nové vnitřní kvantové číslo –

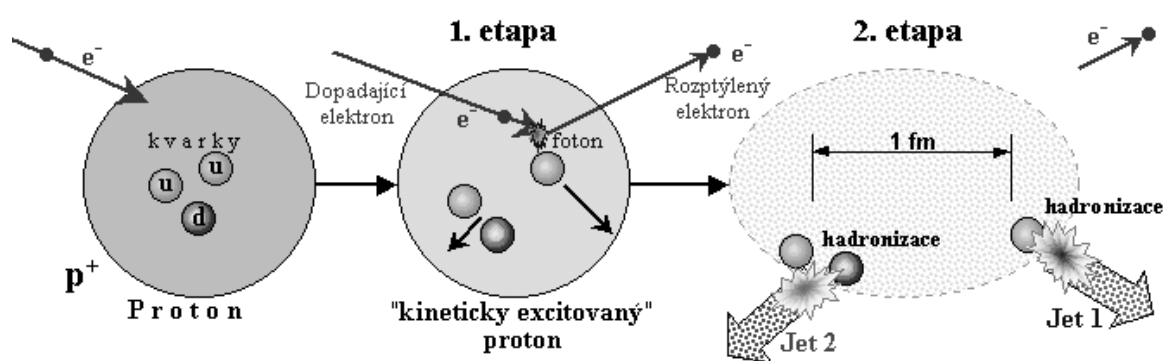
„barvu“ (color), která nabývá tří diskretních hodnot označovaných jako „červená“, „modrá“, „žlutá“; přitom baryony jsou „bezbarvé“ („bílé“) kombinace tří barevných kvarků, mezony pak kombinace kvarků a antikvarků. Hlavní obtíž kvarkové hypotézy však tkví v tom, že žádné volné částice s vlastnostmi kvarků nebyly dosud nikdy pozorovány. Pokud tedy kvarky vůbec existují, musejí být v hadronech velmi silně vázány.

Koncem 60. let byl kvarkový model do určité míry podpořen výsledky experimentů s rozptylem vysokoenergetických elektronů na nukleonech (hluboce nepružný rozptyl) ukazujících na to, že při takovém „tvrdém ostřelování“ se nukleon nechová jako kompaktní částice, ale jako shluk několika (tří) víceméně volných rozptylových center – tzv. partonů. Přitom kvantová čísla partonů (náboj, spin, izospin) odpovídala hodnotám očekávaným u kvarků. Přímému ztotožnění kvarků a partonů však bránil rozpor: na jedné straně se při experimentech partony v nukleonech chovaly jako volné, na druhé straně kvarky jsou tak silně vázány, že je nelze z nukleonů uvolnit.

Jety – stopy po hadronizovaných kvarcích

Za velmi vysokých energií při tvrdých a hluboce nepružných srážkách elektronů s protony vzniká řada sekundárních částic, které vylétají neizotropně v jakýchsi směřovaných „výtryscích“ – jetech. Detailní analýza úhlového rozdělení a energie částic v jetech ukázala následující mechanismus interakce, který lze rozdělit do dvou etap: Během 1. etapy vysokoenergetický elektron při interakci s protonem předá část své kinetické energie jednomu z kvarků, který se po tomto rozptylu po určitou kratičkou dobu pohybuje prakticky volně (asymptotická volnost) uvnitř protonu; podobně i zbytek protonu tvořený dvěma zbývajícími kvarky. Nedojde však k uvolnění kvarků z protonu.

Jakmile vzdálenost mezi vyzářeným kvarkem a zbytkem protonu přesáhne zhruba 1 fm ($=10^{-15}$ m), nastává 2. etapa: síly mezi nimi začnou prudce narůstat a v kvark-gluonovém poli dojde k produkci kvarků a antikvarků, které se zformují do mesonů a baryonů – dojde k tzv. „hadronizaci“ kvark-gluonového plazmatu. Výsledkem je vyzáření dvou úhlově kolimovaných spršek částic – jetů, které vylétají přibližně ve směrech letu kvarku a zbytku protonu v první etapě. Tyto jety jsou vlastně stopami po kvarcích.



Obr. 18 Jety (<http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika5.htm>)

V kvantové chromodynamice se vyskytuje problém CP – narušení kombinace nábojové symetrie a parity v teorii kvarků, který se řeší zavedením částic zvaných axiony – jsou to lehké (klidová hmotnost cca 10^{-5} eV) hypotetické částice se spinem 0, které se někdy diskutují jako možná součást tzv. skryté (temné, nezářící) hmoty ve vesmíru.

Supersjednocení a supergravitace

Názory na úlohu gravitace ve struktuře elementárních částic se velice různí; rozprostírají se mezi dvěma krajními polohami:

a) Gravitace nemá žádný vliv na strukturu a interakce elementárních částic. Tento krajní názor vychází z faktu, že gravitační interakce mezi elementárními částicemi je za všech známých okolností daleko slabší než ostatní druhy interakcí: např. pro dva protony nacházející se v jádře ve vzdálenosti $\sim 10^{-13}$ cm jsou gravitační síly zhruba $\sim 10^{40}$ -krát slabší než elektrické síly a $\sim 10^{42}$ -krát slabší než silné interakce.

b) Druhý krajní názor zastával A. Einstein a jeho následovníci (např. J. A. Wheeler): gravitace jakožto fyzika prostoročasu hraje určující roli ve struktuře elementárních částic, je jejich nejvlastnější podstatou. Podle této koncepce je nutno hledat taková zobecnění geometrických vlastností prostoročasu, jejichž přirozenými důsledky by byly vývody kvantové teorie pole o vlastnostech elementárních částic.

I když supergravitace dosud není završena, jedná se nesporně o velmi nadějnou unitarizační koncepci. Pro ověření správnosti cesty nastoupené supergravitací by bylo podstatné, kdyby se podařilo experimentálně prokázat existenci gravitin.

Teorie superstrun

Jedním z výchozích pojmů fyziky je pojem hmotného bodu – idealizovaného objektu, jehož hmotnost (i ostatní parametry) jsou soustředěny do jediného geometrického bodu prostoru. Trajektorie, kterou probíhá hmotný bod v prostoru je křivka, jejíž každý bod lze charakterizovat prostorovými souřadnicemi a časem. Dynamika hmotného bodu v klasické mechanice je dána Newtonovými rovnicemi, v relativistické mechanice je popsána pohybem po světočáře ve 4-rozměrném rovinném prostoročase STR, nebo v zakřiveném prostoročase OTR. V kvantové mechanice je dynamika částice popsána Schrödingerovou rovnicí; trajektorie, spojující počáteční a koncový stav částice v prostoru, jsou východiskem i při kvantování pomocí Feynmanových integrálů přes trajektorie.

V klasické mechanice byl pojem hmotného bodu pouhou idealizací skutečných těles, výhodnou pro analýzu jejich pohybu. Speciální teorie relativity však posílila důležitost pojmu hmotného bodu: žádný elementární (fundamentální) objekt nemůže mít konečné prostorové rozměry, neboť žádný signál či interakce se nemůže šířit nadsvětelnou rychlostí. Při srážce dvou těles nenulových rozměrů nemohou všechny části reagovat ihned, z čehož plyne, že těleso je složeno z elementárnějších objektů: elementární objekt musí být bodový.

Bodový charakter fundamentálních objektů – zdrojů pole – však vede k závažným problémům v teorii pole: při limitních přechodech k nulovým rozměrům vznikají matematicky divergující výrazy vedoucí k nekonečným hodnotám. Těchto divergencí je třeba se zbavit (v podstatě ad hoc) metodami renormalizace – provést třeba vhodnou kalibrační transformaci tak, aby se výsledky výpočtu shodovaly s experimentálními hodnotami. Podařilo se však najít způsob, jak se těmto nepříznivým matematickým divergencím vyhnout systematicky – jsou to teorie, v nichž namísto bodů jsou elementárními objekty jednorozměrné čáry či smyčky nenulové délky – tzv. struny. Pokud by tyto struny byly dostatečně malé (mikroskopické), nemusejí být pozorovatelné – vypadaly by „z dálky“ jako body.

ENERGIE

Inspirací k vytvoření fyzikálního pojmu energie bylo poznání, že při všech dějích v přírodě se zachovává hodnota určité veličiny. Ta byla nazvána energií.

Korektní použití pojmu energie selhává především na rozlišení stavové či procesní podstaty jevu, popř. na vyčlenění všech podstatných interakcí zkoumaného systému pro daný jev.

Zásadním pravidlem pro pomyslný „život energie“ je zákon zachování a přeměny energie. Zákon zachování energie je jedním ze základních zákonů, jimiž se řídí všechny děje nejen na Zemi, ale v celém vesmíru vůbec.

Podle tohoto zákona v soustavě energie nemůže vznikat z ničeho a nemůže v žádném procesu ani zaniknout. Celkové množství energie zůstává zachováno. Energie se jen přeměňuje, ale neztrácí se a nevzniká.

Energie samozřejmě nežije, je to jen šikovně vymyšlená fyzikální veličina, kterou užíváme pro vyjádření stavu zkoumaného tělesa nebo soustavy těles. Energie je veličinou výhodnou pro popis změn způsobených různými procesy, ději či jinými formami pohybu hmoty.

Za vším, co se kolem nás děje najdeme energii, ovšem také síly (správněji silová působení). Zvířata potřebují energii k pohybu, rostliny k růstu, mraky i vlny v oceánu k přemísťování. Chcete-li se povořit automobilem, musíte mít k dispozici příslušnou energii v palivu.

Ovšem nic z výše uvedeného by se nestalo, žádné změny stavu by nenastaly, kdyby neexistovaly síly, které dokáží přeměnit jeden druh energie na jiný. Síly (přesněji silová působení) jsou třeba k tomu, aby se věci daly do pohybu, aby věci svůj pohybový stav změnil, případně aby se zastavily. Silová působení jsou však typická nejen pro velké viditelné objekty, zdaleka nejsilnější silová působení existují na atomární úrovni. Fyzik řekne, že síly mohou konat práci. Práce sama není energií, ani jednou z jejích forem, byť mají s energií společnou fyzikální jednotku. Je to jen jeden ze způsobů transportu energie.

Energie existuje v mnoha podobách. Své podoby během přírodních dějů často mění. Druhy energie se často pojmenovávají podle zdrojů, v nichž je daná energie uložena a z nichž ji lidstvo čerpá: sluneční energie, vodní energie, atomová energie, geotermální energie, energie biomasy apod.

Jiný pohled, fyzikálnější, je založen na preciznějším rozlišení druhu energie tělesa podle toho, jakých vzájemných silových působení se zkoumané těleso účastní – gravitační potenciální energie, potenciální energie elektronů v elektrickém poli, potenciální energie pružnosti apod. Jestliže se dané těleso vůči pozorovateli pohybuje, říkáme, že má pohybovou (kinetickou) energii.

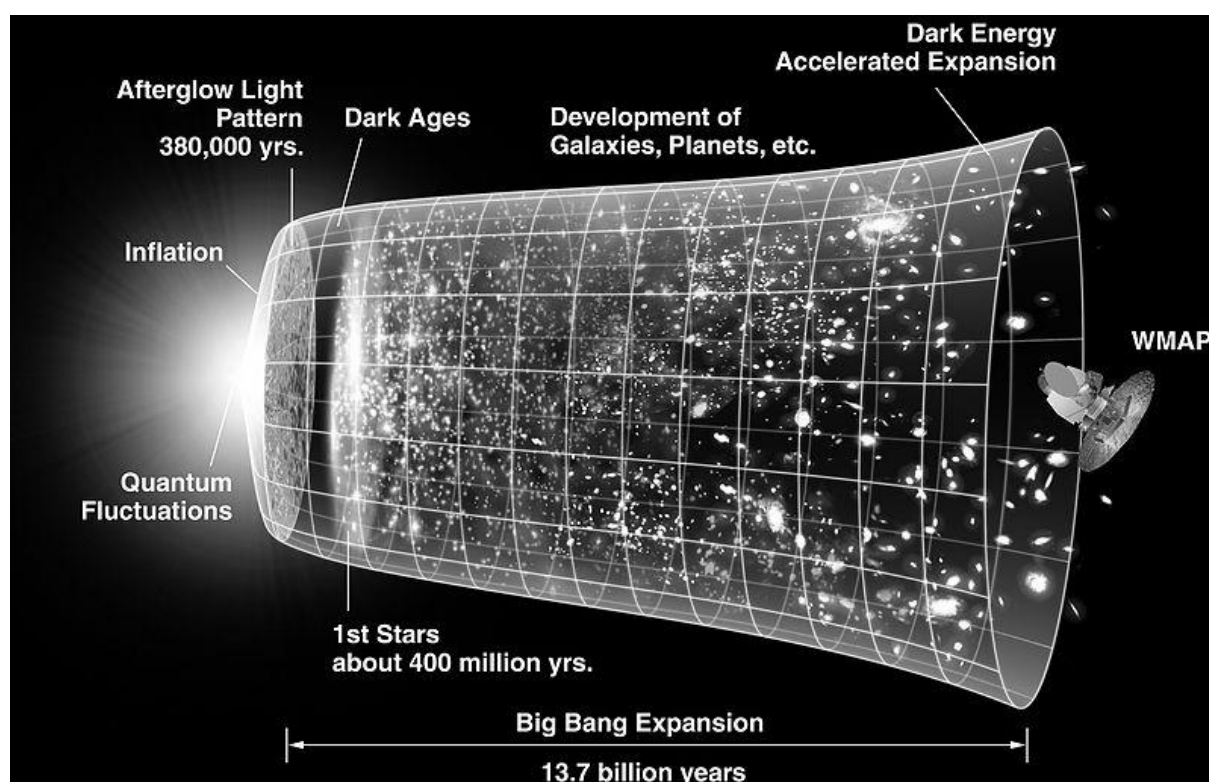
Energii měříme v joulech (J), z lidského hlediska je to dosti malá jednotka. Například: potenciální energii jablka v gravitačním poli Země zvýšíme o 1 J, zdvihneme-li jablko o tíže 1 N o 1 m výše. Zvýšení potenciální energie jablka jsme dosáhli tím, že jsme působili stálou silou 1 N po dráze 1 metr proti směru gravitační síly, fyzikálně řečeno vykonali jsme práci 1 J. Na vykonání práce, na usměrněný přenos energie, jsme ovšem spotřebovali část své energie. Lidé získávají energii z potravy.

Kde se vzala energie uložená v potravě? Z rostlin, které procesem fotosyntézy stále ukládají část přijaté sluneční energie do cukrů, škrobů, tuků a bílkovin. Když živočich rostlinu sní, dokáže jeho trávení energii uskladněnou v rostlině využít na práci, část se mění v teplo produkované organismem a část se může uložit ve formě tuků v těle.

V domácnosti, průmyslu, dopravě a zemědělství jsou hlavními zdroji energie fosilní paliva (uhlí, ropa, zemní plyn). Tato paliva vznikla v dávných dobách z pozůstatků těl rostlin a živočichů. Přeneseně řečeno fosilní paliva představují sluneční energii zachycenou před miliony lety zelenými rostlinami na pevnině (uhlí) a fytoplanktonem v mořích (ropa, zemní plyn). Slunce čerpá svoji energii z termionukleárních reakcí.

Univerzální platnost zákon zachování energie nám dovoluje hledat minulost a původ každé energie, s níž se na Zemi setkáváme. Tyto proměny energie lze sledovat až k samému počátku vesmíru. Tento počátek se dnes odhaduje na dobu nejméně před deseti miliardami let.

Většina odborníků se domnívá, že vesmír vznikl při tzv. velkém třesku (Big Bang). Velký třesk si lze představit jako obrovský výbuch, při němž se uvolnila obrovská energie a došlo k vytvoření veškeré hmoty. Zprvu byl vesmír hustý a žhavý, při jeho postupném rozpínání vznikly galaxie a v nich hvězdy. Lidské tělo, stejně jako všechny nás obklopující věci, se skládají z prvků, které vznikly při jaderných reakcích v nitru hvězd a supernov po tomto třesku. Jen vodík je starší.



Obr. 19 Vývoj vesmíru

(http://map.gsfc.nasa.gov/media/060915/060915_CMB_Timeline300.jpg)

Nejstarší formou energie, kterou má lidstvo k dispozici, je klidová energie protonů. Vodík byl a dosud je nejhojnějším prvkem ve vesmíru, je termionukleárním palivem pro hvězdy a možným zdrojem pro pozemské termionukleární reaktory. V oceánech jsou obrovské zásoby nejen vodíku obyčejného, ale i jeho izotopu – deuteria. Vodík a deuterium jsou archaickým palivem mnohem starším, než jsou fosilní paliva.

Další velmi starou formou je rotační kinetická energie Země, jež je dědičným odkazem z počátečního období vesmíru. Všechno ve vesmíru je v pohybu od jednotlivých částic v nukleonech až po supergalaxie. Pohyb v kosmickém měřítku – rotace vesmírných těles

a především rozpínání celého vesmíru pocházejí z dob Velkého třesku. Země, podobně jako ostatní vesmírná tělesa, byla vybavena kinetickou energií posuvného a rotačního pohybu. Její kinetická rotační energie zvolna ubývá v důsledku slapových jevů (přílivu a odlivu).

Nejmladší energií je vlastně přímé sluneční záření. Sluneční paprsky za našimi okny lze považovat za nejmladší podobu energie, neboť je jim asi 8 minut. Všechny fotony slunečního světla se rodí na povrchu Slunce, ve vrstvě plazmatu asi 250 km silné o teplotě přibližně 6 000 K. Naše Země je vystavena od svého vzniku před 4,6 miliardami roků obrovskému přívalu slunečních fotonů. Všechny sluneční paprsky dohromady za 1 sekundu přinášejí na Zemi celkem energii 180 000 TJ.

Bilance sluneční energie

Země ze Slunce dostává obrovské množství slunečního záření, představovalo by to výkon 180 000 TW. Tato energie pro lidstvo zůstává zatím bez většího technického využití. Přitom je čistá, v množství dvacetisíckrát větším než lidstvo potřebuje, je zadarmo a prakticky věčná, neboť Slunce ji bude Zemi v neztencené míře poskytovat ještě dalších pět miliard let. A to už několik miliard let slouží sluneční energie Zemi.

Asi třetina dopadajícího slunečního záření (asi 60 000 TW) se odráží ze Země zpět do kosmického prostoru. Jen 90 TW mění zelené rostliny a fytoplankton v mořích pomocí fotosyntézy v energii biosféry. Fotosyntéza je hlavní bránou sluneční energie do pozemské biosféry. Sluneční energie se uskládá v biomase, odkud ji lze získávat (dřevo, sláma, zvířecí trus, organický odpad). Stáří energie biomasy je velmi rozmanité od několika hodin u planktonu, tisíciletí u starých sekvojí, až po stovky miliónů let u fosilních paliv.

Nejvýznamnější chemickou reakcí v přírodě, na které je závislý život, je fotosyntéza. Probíhá v zelených rostlinách za účasti chlorofylu a slunečního záření. Při fotosyntéze vzniká z oxidu uhličitého (ve vzduchu) a z vody glukóza a kyslík.



Glukóza je bílá krystalická látka, dobře rozpustná ve vodě (tzv. hroznový cukr). Je významným zdrojem energie, která je potřebná pro život organismů.

Téměř všechno neodražené sluneční záření (120 000 TW) je pohlceno povrchem Země a v atmosféře. Tím, že je povrch Země nerovnoměrně prohříván, dochází ke vzniku proudění v atmosféře, proudů v hydrosféře a také dochází k nerovnoměrnému vyzařování ve formě tepelného infračerveného záření.

Již od dávných dob člověk využívá energii větru i vodních toků. Většina energie na Zemi tedy pochází z nitra Slunce.

Všem chemickým prvkům, které jsou uvedeny v Mendělejevově chemické soustavě, dal vznik vodík v mateřské supernově, jejímž výbuchem vznikla i naše Sluneční soustava. Obnovitelné energie termálních vod, sopečná energie, elektřina z dukovanské atomové elektrárny, i zneužitá energie atomových bomb – to vše odvozuje svou energii z gravitačního kolapsu dávné supernovy asi před 7 miliardami let.

Původ každé energie, ať v jakékoli formě na Zemi, je tedy velmi starý. Energie se různými proměnami dostala do našich svalů, do kamen, motorů, do větru, uranu, horkých pramenů či slunečního záření a paprsků vzdálených hvězd. Celý vývoj vesmíru souvisí s přeměnami energie. Je to zajímavý proces řízený zákonem zachování energie.

Tabulka 12 Přeměny různých forem energie

forma	mechanická	tepelná	elektrická	zářivá	chemická	jaderná
mechanická	vodní turbíny	tření	alternátory			
tepelná	tepelné stroje	radiátory	termočlánky	tepelné zářiče		
elektrická	elektromotory	elektrická topidla	transformátory	výbojky	elektrolýza	urychlovače
zářivá	tlak záření	sluneční kolektory	fotočlánky	lasery	fotosyntéza	
chemická	svaly, výbušniny	hoření	galv. články	fluorescence	chem. reakce	
jaderná	jaderné výbuchy	jaderný reaktor		radioaktivita		jaderné reakce

Tabulka 13 Převod užívaných jednotek

	joule	elektronvolt	kilowatthodina	tuna měrného paliva
joule	1 J	$6,24 \cdot 10^{18}$ eV	$2,78 \cdot 10^{-7}$ kWh	$3,41 \cdot 10^{-11}$ tmp
elektronvolt	$1,6 \cdot 10^{-19}$ eV	1 eV	$4,45 \cdot 10^{-26}$ kWh	$5,46 \cdot 10^{-30}$ tmp
kilowatthodina	$3,60 \cdot 10^6$ J	$2,24 \cdot 10^{25}$ eV	1 kWh	$1,23 \cdot 10^{-4}$ tmp
tuna měrného paliva	$2,931 \cdot 10^{10}$ J	$1,85 \cdot 10^{29}$ eV	$8,14 \cdot 10^3$ kWh	1 tmp

Teplo

Teplo ve fyzice je, na rozdíl od běžného života, také dosti abstraktní pojem.

Dodnes se setkáváme s diskutabilním tvrzením, že teplo je forma energie. Pokud máme na mysli fyzikální obsah pojmu energie, není tomu tak. Teplo není forma energie obsažená v tělese, teplo je, podobně jako termín práce způsob přenosu energie.

Mění-li se energie zkoumané soustavy prostřednictvím usměrněných pohybů částic, označujeme tento přenos energie jako práci. Při konání práce se tělesa nebo jejich části přemisťují po určité dráze vlivem silového působení.

Pokud se však mění energie soustavy prostřednictvím chaotických nárazů a neusměrněných pohybů molekul či atomů, případně emisí či absorpcí fotonů, označujeme tento přenos jako teplo. Teplo, stejně jako práce, jsou procesní veličiny a závisejí na ději, který v soustavě probíhá. Tělesa, mezi nimiž se energie teplem přenáší, jsou v kontaktu, ale navzájem mohou být makroskopicky v klidu. Tento přenos energie mezi tělesy je velmi častý.

Teplo má jednotku stejnou jako energie. Starší jednotkou je kcal, cal. Ta má historický původ, její zavedení souvisí s představou, že teplo je nějaká nevažitelná látka, fluidum, proto byla pro tuto látku vytvořena zvláštní jednotka.

(Pozn. 1 cal je teplo potřebné k ohřátí 1 gramu vody o 1 °C, přibližně platí 1 cal = 4,2 J; 1 J = 0,24 cal). Dodnes tyto jednotky přežívají v kalorickém ohodnocení potravin.

Teplo a teplota

Tyto pojmy si lidé často pletou a v běžné mluvě si tuto záměnu ani neuvědomují (např. výraz: doma je teplo). Pokud se zeptáte, zda je venku teplo, běžně vám lidé odpovídají, že je tam například třicet stupňů celsia.

V podstatě lze říci, že jde pouze o rozdíl mezi odborným jazykem fyziků a jazykem běžného života, v němž není nutno, aby slova měla přesně vymezený význam. Navíc teplo a teplota spolu skutečně často úzce souvisejí, (v češtině mají dokonce stejný slovní základ; pozor na adjektiva tepelný x teplotní), byť fyzikální podstata těchto veličin je zcela odlišná.

Teplota je stavovou veličinou, popisuje stav daného tělesa. Teplota je mírou kinetické energie molekul daného tělesa. Teplotu tělesa můžeme změnit dodáním nebo odebráním tepla nebo vykonáním práce pomocí konkrétního silového působení. Teplotu měříme teploměry obvykle v celsiových stupních.

O teple jsme již hovořili výše, je to veličina procesu popisující konkrétní mechanismus (chaotického) přenosu energie mezi soustavami. Teplo se měří množstvím energie dodané „tako chaoticky“ soustavě. Jinak řečeno teplo je ve fyzice výraz pro specifikaci způsobu přenosu energie.

Tepelná výměna by mělo být označení pro děj, při němž předávají částice tělesa o vyšší teplotě část své kinetické energie částicím chladnějšího tělesa, a to tak dlouho než se obě počáteční teploty těles vyrovnají. (Analogicky pro interakci s fotony). Toto označení se hodně používá v učebnicích, kde nahrazuje a zpřesňuje výrazy: teplo se šíří..., teplo se odebírání, které v dětech implikují představu nějaké fluidové veličiny, jež je někde obsažena. Domníváme se, že ani tento zástupný termín nevystihuje podstatu věci a tedy je lépe hovořit o ohřívání, ochlazování těles než uměle zavádět termín.

Teplo není veličinou stavovou, nelze říci, že v nádobě s vodou je teplo 100 J.

Kupodivu, však lze říci např., že těleso přijalo z okolí teplo 100 J (vlastně, přijalo teplem energii 100 J). Přednost by mohlo mít obecnější vyjádření, že těleso ohříváním zvýšilo svou vnitřní energii o 100 J. Máme-li pod pojmem teplo jasno, můžeme užívat i tento termín, pozor na veličiny historicky zavedené jako výparné teplo, latentní, skupenské teplo apod.

K ohřívání těles (tepelné výměně, k šíření tepla), dochází několika způsoby: vedením, prouděním nebo sáláním.

Získávání tepla hořením.

Užitím ohně udělal člověk obrovský krok kupředu, od této chvíle dokázal lépe upravit potravu, ochránit se před šelmami, ale také díky tomu mohl obydlet i kraje, které by mu jinak svými teplotními podmínkami byly nedostupné. Ohněm získal zdroj tepla, světla, ale i možnost zpracovávat nalezené suroviny. Začal tavit a zpracovávat kovy. Dodnes je oheň pro lidstvo kultovním symbolem, v kostelech hoří věčné světlo, ve sváteční dny zapalujeme svíce.

Pro získání ohně je třeba palivo, kyslík a zahřátí paliva na zápalnou teplotu. Chybí-li kterákoliv z těchto složek, hoření nezačne nebo brzy skončí. Hoření je chemickou reakcí mezi palivem a kyslíkem. Energie uvolňovaná při chemické reakci se projevuje jako teplo, zvuk, záření, elektřina apod.

Některé chemické reakce teplo uvolňují (exotermické reakce) a jiné naopak teplo pohlcují (endotermické reakce). Vytvoří-li se reakcí nové chemické vazby, v nichž je dohromady uloženo méně energie, než bylo v původních vazbách, vzniká takovou reakcí teplo.

Když hoří dřevo, uvolňuje se chemická energie v podobě horkých spalin a uhlíku (a záření). Podobně probíhá reakce – hoření metanu, hlavní složky zemního plynu. Při hoření metanu se přeruší původní vazby a vytvoří se nové vazby. Energie potřebná na přerušení původních vazeb je menší než energie uvolněná při vzniku nových vazeb v produktech reakce – oxidu uhličitém a vodní páře. Výsledkem je, že přebytečná energie se uvolňuje hlavně formou tepla a tím se zvyšuje teplota okolí. Jde o příklad exotermické reakce.

Při spalování na Zemi se kyslík ze vzduchu slučuje s uhlíkem obsaženým v palivu na oxid uhličitý. Např. na Měsíci se oheň rozdělat nepodaří – na Měsíci není kyslík nutný pro hoření.

Lidé sestrojili stroje, které dokážou část tepla měnit na mechanickou práci a zbytek tepla předávají okolí. Takovým strojům říkáme tepelné stroje. Jako první byly zkonstruovány parní stroje, které jako topivo používaly zejména uhlí. Pracovní látkou byla horká pára. Parní stroje poháněly čerpadla v dolech, stroje v továrnách, později i lodě a vlaky. V minulých stoletích byly parní stroje hlavními stroji v průmyslu vůbec.

Dnes se v dopravních prostředcích používají motory s vnitřním spalováním, u nichž se palivo vstříkává přímo do válce, kde se vznítí a rozpínající plyny stlačují pracovní píst. Je to rozdíl oproti parním strojům, které užívaly vnějšího spalování paliva pro získání páry v parním kotli, horká pára pak byla přivedena do pracovního válce, kde se rozpínala a poháněla píst.

Pára nám však slouží dodnes v elektrárnách, kde pohání turbíny připojené ke generátorům elektrického proudu.

POHYBOVÁ ROVNICE

2. Newtonův pohybový zákon – zákon síly

Lze napsat pohybovou rovnici částice. Newton definoval množství pohybu pomocí hmotnosti částice a její rychlosti, tzn. že se jednalo o veličinu hybnost

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = k\vec{F}. \quad (72)$$

Pokud je hmotnost konstantní, máme $m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a} = \vec{F}$, kde jsme k položili rovno 1.

Odtud lze psát pohybovou rovnici ve tvaru

$$m\vec{a} = \vec{F}, \quad (73)$$

je-li hmotnost konstantní, jinak

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}. \quad (74)$$

Odtud hledáme zákon pohybu částice, pokud známe počáteční podmínky pohybu. Řešíme rovnice:

$$m \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \vec{F}, \quad \vec{r}(t_0) = \vec{r}_0, \quad \vec{v}(t_0) = \vec{v}_0 \quad (75)$$

Rovnice je vektorová, v trojrozměrné kartézské soustavě souřadnic představuje 3 diferenciální rovnice 2. řádu. Pro řešení je třeba znát 6 počátečních podmínek:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= F_x, x(t_0) = x_0, \dot{x}(t_0) = v_{0x} \\ m\ddot{y} &= F_y, y(t_0) = y_0, \dot{y}(t_0) = v_{0y} \\ m\ddot{z} &= F_z, z(t_0) = z_0, \dot{z}(t_0) = v_{0z} \end{aligned} \quad (76)$$

$$a = \frac{F}{m} = \text{konst.}, \quad v = at + v_0, \quad s = s_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2 \quad (77)$$

Zpomalený pohyb nastane, pokud konstantní síla působí proti směru pohybu

$$a = \frac{F}{m} = \text{konst.}, \quad v = v_0 - at, \quad s = s_0 + v_0t - \frac{1}{2}at^2. \quad (78)$$

V homogenním tíhovém poli Země ve vakuu, pokud na hmotný bod působí jen stálá tíhová síla, která je kolmá ke směru počáteční rychlosti, dostáváme případ vodorovného vrhu:

$$x = v_0t, \quad y = y_0 - \frac{1}{2}gt^2, \quad v_x = v_0, \quad v_y = -gt \quad (79)$$

Hmotnost, která vystupuje v těchto rovnicích, je tzv. hmotnost setrvačná. Pokud určíme hmotnost vážením, určíme tíhovou hmotnost, která je na Zemi (rotuje) určena jako výslednice gravitační a setrvačné hmotnosti. Aby bylo možné rovnici řešit, je třeba změřit sílu nezá-

vislým způsobem – proto byl Newtonem definován gravitační zákon, který vyjadřuje silové působení dvou částic, které mají gravitační hmotnosti m_1, m_2 a jsou ve vzájemné vzdálenosti r

$$\vec{F} = -\kappa \frac{Mm}{r^3} \vec{r}_0. \quad (80)$$

Gravitační síla je centrální, pro povrch Země je $r = R_Z$, a síla, kterou Země působí na těleso o hmotnosti m , může být vyjádřena jako

$$F = m\kappa \frac{M_Z}{R_Z^2} = ma_g, \quad (81)$$

kde

$$a_g = \frac{\kappa M_Z}{R_Z^2}. \quad (82)$$

Země rotuje, proto tíhové zrychlení \vec{g} je výslednicí vektorového součtu zrychlení gravitačního a odstředivého setrvačného. Tíhové zrychlení lze zjistit pomocí měření.

Experimentálně bylo zjištěno, že všechna tělesa padají v tíhovém poli se stejným zrychlením, přitom nezávisí na jejich hmotnosti ani materiálu, z něhož jsou zhotovena. Odtud plyne, že gravitační hmotnost je úměrná hmotnosti setrvačné, tzn. že je můžeme vyjádřit pomocí stejných jednotek. Prakticky to znamená, že hmotnost lze určit vážením.

To, že hmotnost setrvačná a gravitační jsou si rovny, je jednoduchá formulace tzv. *principu ekvivalence*. Na tomto principu byla A. Einsteinem založena teorie gravitace, tzn. *obecná teorie relativity*.

Experimentální ověření úměrnosti setrvačné a gravitační hmotnosti se realizuje pomocí pokusů s kyvadly. Je stanoven tzv. Eötvösův poměr:

$$\eta = \frac{2 \left| \left(\frac{m_g}{m_s} \right)_1 - \left(\frac{m_g}{m_s} \right)_2 \right|}{\left| \left(\frac{m_g}{m_s} \right)_1 + \left(\frac{m_g}{m_s} \right)_2 \right|} \quad (83)$$

Princip ekvivalence platí, je-li koeficient roven 0.

Práce

Síla působící po nějaké dráze

$$W = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} \cdot \vec{v} dt = m \int_{t_1}^{t_2} \frac{d\vec{v}}{dt} \cdot \vec{v} dt = \frac{m}{2} \int_{t_1}^{t_2} \frac{d(v^2)}{dt} dt = \frac{1}{2} mv_2^2 - \frac{1}{2} mv_1^2 = T_2 - T_1, \quad (84)$$

což představuje výpočet změny kinetické energie.

Práce a kinetická energie jsou veličiny, které mají stejný rozměr, jejich jednotkou je 1 joule (1 J). Kinetická energie je stavová veličina, práce je veličina procesní.

Síly potenciální

V prostoru existuje silové pole, kdy na částici působí síla $\vec{F}(x, y, z, t)$ v každém bodě

a v každém okamžiku. Pokud může být tato síla vyjádřena jako gradient skalární funkce $U(x, y, z, t)$, je to tzv. *potenciální funkce*

$$\vec{F} = -\nabla U = -\left(\frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}, \frac{\partial U}{\partial z}\right). \quad (85)$$

Síla je tzv. potenciální. Pokud potenciální síla nezávisí na čase, hovoříme o potenciální energii a síly jsou tzv. konzervativní. Totální diferenciál potenciální energie zapisujeme ve tvaru

$$dU = -\vec{F} \cdot d\vec{r}. \quad (86)$$

Znaménko minus znamená, že práce, kterou konají vnější síly proti silám pole, má za následek zvýšení potenciální energie částice.

Potenciální energie částice, která je funkcí souřadnic, je východiskem pro určení síly, která na částici působí a naopak

$$\vec{F} = -\nabla U, \quad U = -\int \vec{F} \cdot d\vec{r} + C. \quad (87)$$

Pokud složka síly F_x závisí jen na x , za předpokladu, že funkce je integrabilní, můžeme najít vždy potenciální energii $U(x)$ a taková síla bude konzervativní. Platí

$$F_x = -\frac{dU}{dx}, \quad U = -\int F_x dx + C. \quad (88)$$

Můžeme vyjádřit práci konzervativních sil

$$W = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{r} = -\int_1^2 dU = U_1 - U_2 = T_2 - T_1. \quad (89)$$

Odtud

$$U_1 + T_1 = U_2 + T_2 = E. \quad (90)$$

V poli konzervativních sil je součet kinetické a potenciální energie konstantní. Velikost práce nezávisí na tom, po jaké trajektorii se částice pohybovala, závisí jen na počáteční a koncové poloze. Pokud je trajektorie uzavřená, práce konzervativních sil je nulová.

Síly disipativní (tření) – síly nekonzervativní, závisí na rychlosti částice. Mechanická energie se nezachovává, část je předána okolí ve formě tepla.

Řešení pohybové rovnice – jednorozměrný pohyb

Pohyb částice závisí jen na jedné souřadnici. Uvažujeme-li jednotkovou hmotnost částice, řešíme rovnici $\frac{d^2 x}{dt^2} = f(t, x, \frac{dx}{dt})$, kde počáteční podmínky jsou $x = x_0$, $\frac{dx}{dt} = v_0$ při $t = t_0$.

Jednoznačné řešení existuje, je-li funkce spojitá všech tří proměnných a má spojitě parciální derivace.

Zvláštní případy:

Konstantní síla: $\frac{d^2 x}{dt^2} = a_x = \text{konst.}$

Síla závislá na čase: $\frac{d^2x}{dt^2} = a_x(t)$... nerovnoměrný pohyb

Síla závislá na poloze: $\frac{d^2x}{dt^2} = f(x)$... konzervativní síly

Úpravy:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d}{dx} \frac{dx}{dt} \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dx} \frac{dx}{dt} \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \right) = f(x)$$

Konzervativní sílu vyjádříme pomocí potenciální energie

$$f(x) = \frac{1}{m} F_x = -\frac{1}{m} \frac{dU}{dx}.$$

Odkud

$$\frac{1}{2} m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + U(x) = E = \text{konst.},$$

což je zákon zachování energie v poli konzervativních sil. Toto je diferenciální rovnice 1. řádu, kterou řešíme separací proměnných. Zákon pohybu lze psát potom jako závislost $t = t(x)$

$$t = t_0 \pm \int_{x_0}^x \frac{dx}{\sqrt{\frac{2}{m} [E - U(x)]}}.$$

Odtud plyne, že celková energie musí být větší nebo rovna potenciální energii.

Síla závislá na rychlosti: síla není konzervativní. Pohybová rovnice je řešena separací proměnných a je-li $v_x(t) = g(t)$, dostaneme $x = x_0 + \int_{t_0}^t g(t) dt$.

Pohyb v odporujícím prostředí

Pohyb brzděný pouze smykovým třením – rychlost pohybu tělesa je malá, síla tření je konstantní, je úměrná kolmé tlakové síle v závislosti na koeficientu smykového tření.

Pohybová rovnice $\vec{F} + \vec{F}_t = m\vec{a}$, kde platí pro:

a) $F > F_t$... pohyb rovnoměrně zrychlený, $a = \frac{F - F_t}{m}$

b) $F = F_t$... pohyb rovnoměrný

c) $F < F_t$... pohyb rovnoměrně zpomalený $a = \frac{F_t - F}{m}$

Síla tření je úměrná první (popř. druhé) mocnině rychlosti:

Počáteční podmínky: $t = 0, x = 0, \frac{dx}{dt} = 0$. Řešíme rovnici $\frac{d^2x}{dt^2} = -k v_x$, $dt = -\frac{1}{k} \frac{dv_x}{v_x}$ a máme

$$v_x = v_0 e^{-kt}, \quad x = \frac{v_0}{k} (1 - e^{-kt}).$$

Rychlost s časem exponenciálně klesá a těleso se blíží k bodu, který má souřadnici $x = \frac{v_0}{k}$ (případ automobilu, který dojíždí např. ke křižovatce s vypnutým motorem).

Odporující síla je úměrná rychlosti tělesa:

$$F \sim v: m \frac{dv_x}{dt} = -6\pi r \eta v_x, \quad v_x(t) = v_0 e^{-bt}$$

$$F \sim v^2: m \frac{dv_x}{dt} = -\frac{1}{2} C \rho S v_x^2 \quad (\text{pro } v_x > 0), \quad v_x(t) = \frac{v_0}{1 + b v_0 t}$$

První vztah je Stokesův vzorec, který platí i pro obtékání koule laminárním prouděním. Koeficient η je tzv. koeficient dynamické viskozity. Druhý vztah je Newtonův vzorec, kde S je příčný průřez tělesa, ρ je hustota tekutiny, C je koeficient závisující na tvaru tělesa (padák 1,33, aerodynamický tvar 0,01).

Volný pád v tekutině, která se nepohybuje: $m\vec{a} = \vec{F}_G + \vec{F}_v + \vec{F}_o = m\vec{g} - V\rho\vec{g} - k\vec{v}$, kde \vec{F}_G je tíhová síla, \vec{F}_v je vztlak (hydrostatický nebo aerostatický), \vec{F}_o je odporová síla, V je objem tělesa, ρ je hustota prostředí, ρ_0 je hustota tělesa. Velikost okamžitého zrychlení lze vyjádřit jako $a = \frac{dv}{dt} = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right) - \frac{k}{m} v$. Pro určitou mezní rychlost se síla odporová vyrovná se silou tíhovou a vztlakovou a pohyb se stává rovnoměrný. Pro v_m platí

$$mg - V\rho g - kv_m = 0, \quad v_m = \frac{V(\rho - \rho_0)g}{k}.$$

Pro pád tělesa ve vzduchu lze vztlak zanedbat a máme

$$a = \frac{dv}{dt} = g - \frac{k}{m} v.$$

Řešení vztahené k jednotkové hmotnosti. Počáteční podmínky $t = 0, z = h, \frac{dz}{dt} = 0$.

Máme

$$v_z = \frac{g}{k} (e^{-kt} - 1), \quad z = h - \frac{g}{k} t + \frac{g}{k^2} (1 - e^{-kt}).$$

Pro malý odpor, kdy k se blíží k nule, dostáváme vztah pro vakuum, kdy za dostatečně dlouhou dobu se rychlost pádu ustálí na hodnotě $v_z = -g/k$.

Pohybová rovnice pro malé rychlosti, kdy na těleso působí Stokesova síla:

$$m \frac{dv_x}{dt} = -6\pi r \eta v_x$$

Počáteční podmínka: $v_0 = v_x(0)$

Řešením je rovnice, udávající rychlost částice $v_x(t) = v_0 e^{-bt}$,

kde $b = \frac{6\pi r\eta}{m}$. Odtud

$$x(t) = -\frac{v_0}{b} e^{-bt} + x_0.$$

Pohybová rovnice, kdy na těleso působí síla úměrná druhé mocnině rychlosti, vyjádřená Newtonovým vzorcem

$$m \frac{dv_x}{dt} = -\frac{1}{2} C \rho S v_x^2.$$

Řešíme jednorozměrný případ pro pohyb tělesa ve směru osy x .

Označíme $a = \frac{C\rho S}{2m}$, $v_0 = 1/k$ a řešením diferenciální rovnice dostaneme

$$v_x(t) = \frac{v_0}{1 + av_0 t}$$

a dále

$$x(t) = \frac{1}{a} \ln|1 + av_0 t| + x_0$$

(platí pro $t > -\frac{1}{av_0}$).

Další příklady pohybových rovnic:

- Pohyb hmotného nabitého bodu v homogenním elektrickém poli

Na hmotný bod, který má náboj q a který se pohybuje v homogenním elektrickém poli o $\vec{E} = \text{konst.}$, působí síla $\vec{F} = q\vec{E}$.

Pohybová rovnice $m \frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{E}$

Integrací získáme výraz $\vec{v} = \frac{q\vec{E}t}{m} + \vec{v}_0$

Další integrací máme $\vec{r} = \frac{q\vec{E}t^2}{2m} + \vec{v}_0 t + \vec{r}_0$

Řešíme-li pro $\vec{E} = (E, 0, 0)$, máme:

$$x(t) = \frac{qEt^2}{2m} + v_{0x}t + x_0$$

$$y(t) = v_{0y}t + y_0$$

$$z(t) = v_{0z}t + z_0$$

Hmotný bod se pohybuje po parabole s konstantním zrychlením.

- Pohyb hmotného bodu nesoucího náboj q v homogenním magnetickém poli

Na hmotný bod s nábojem q působí v homogenním magnetickém poli o indukci $\vec{B} = \text{konst.}$ síla (Lorentzova síla)

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}.$$

Pohybová rovnice:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Řešení: ve směru \vec{B} volíme směr osy z ($\vec{B} = (0, 0, B)$), $\vec{v} \times \vec{B} = (v_y B, -v_x B, 0)$ a rozepíšeme:

$$m \frac{dv_x}{dt} = Bv_y q$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = -Bv_x q$$

$$m \frac{dv_z}{dt} = 0$$

Integrací složky z máme $z(t) = v_0 t + z_0 \dots$ rovnoměrný pohyb.

První z rovnic derivujeme a upravíme $\frac{d^2 v_x}{dt^2} = \left(\frac{qB}{m}\right) \frac{dv_y}{dt}$, dosadíme za $\frac{dv_y}{dt} = -\frac{qB}{m} v_x$. Odtud

$$\frac{d^2 v_x}{dt^2} + \left(\frac{qB}{m}\right)^2 v_x = 0.$$

Řešení:

$$v_x = A \cos\left(\frac{qB}{m} t\right) \text{ (fázové posunutí volíme 0)}$$

$$v_y = -A \sin\left(\frac{qB}{m} t\right)$$

$$A^2 = v_x^2 + v_y^2$$

Označíme $\left(\frac{qB}{m}\right) = \omega$, potom lze rovnice přepsat na tvar $v_x = A \cos(\omega t)$, $v_y = -A \sin(\omega t)$

jejichž vyřešením máme:

$$x(t) = \frac{A}{\omega} \sin(\omega t + \varphi_0) + x_0$$

$$y(t) = \frac{A}{\omega} \cos(\omega t + \varphi_0) + y_0$$

$$x^2 + y^2 = \left(\frac{A}{\omega}\right)^2 = r^2$$

V rovině xy se bod pohybuje po kružnici, pohyb ve směru osy z je rovnoměrný.

Vlnová rovnice

Rovnice – hyperbolická, parciální diferenciální, používá se pro popis vln. Ukážeme její řešení v případech různých fyzikálních oborů.

Nejjednodušší případ vlnové rovnice pro funkci $u = u(x, y, z, t)$ lze psát ve tvaru

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \Delta u,$$

kteřá popisuje šíření vlnění v prostoru v závislosti na čase. Funkce u představuje okamžitou hodnotu veličiny, jejíž šíření je popisováno (hustota, výchylka, elektrické pole) v daném bodě o souřadnicích x, y, z , v čase t , c je rychlost světla a

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}.$$

Pomocí této rovnice lze popsat šíření akustických a světelných vln v prostoru, kmitání membrány, kmity struny.

Speciálním případem této rovnice (jednorozměrná), je funkce

$$u(x, t) = u_0 \cos(\omega t - kx).$$

Rovnice pro kmity struny (příčné kmity)

Struna má délku x a je napínána silou T . Strunu vychýlíme a výchylku v bodě x v čase t označíme $u(x, t)$. Předpokládáme existenci malých kmitů, kdy napětí ve všech bodech považujeme za konstantní a zanedbáváme rozdíl mezi $\tan \alpha$ a $\sin \alpha$. Napětí má směr tečny.

Uvažujeme element struny o délce dx (M_A, M_B) o hmotnosti $dm = \rho dx$, který po vychýlení přejde do elementu $N_A N_B$. Na strunu působí síly F_A, F_B které lze vyjádřit pomocí vztahů

$$F_A = T \sin \alpha_A, \quad F_B = T \sin \alpha_B$$

Na element dx potom působí síla $dF = F_B - F_A$

Protože jsme předpokládali malé kmity, lze $\sin \alpha$ nahradit směrnici $\tan \alpha = \frac{\partial u}{\partial x}$ a máme

$$dF = T \left[\frac{\partial u(x + dx, t)}{\partial x} - \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right]$$

Platí druhý Newtonův zákon pro daný úsek struny – výslednice sil působících na úsek struny je rovna součinu hmotnosti a zrychlení. Označíme-li rychlosti struny $v = \frac{\partial u}{\partial t}$, pak

$$a = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

a výslednice sil je

$$dF = \rho dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}.$$

Porovnáme-li výše uvedené rovnice, dostaneme

$$T \left[\frac{\partial u(x+dx, t)}{\partial x} - \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right] = \rho dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2},$$

výraz v hranaté závorce lze převést na diferenciál $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) dx$. Po vydělení rovnice výrazem ρdx dostaneme

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{T}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

Nahradíme-li poměr T/ρ symbolem c^2 , dostaneme vlnovou rovnici ve tvaru

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2},$$

kde c je rychlost vlnění.

Rychlost zvuku

Vlnění se šíří ve směru osy x . Zvolíme-li element plynu o průřezu S , tloušťce dx kolmý na směr šíření vlnění a pohybující se rychlostí v , je tento element pospán následujícími rovnicemi

$$\rho S dx \frac{dv}{dt} = S [p(x, t) - p(x + dx \cdot t)]$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0$$

$$p = p(\rho)$$

První rovnice je pohybová rovnice pro daný element, druhá rovnice je rovnicí kontinuity a třetí je stavová rovnice vyjadřující vztah mezi hustotou a tlakem.

Rovnice upravíme:

a. *Pohybová rovnice* – hranatou závorku, která obsahuje tlaky působící na element v místě x a $x + dx$ nahradíme diferenciálem $p(x, t) - p(x + dx, t) = -\frac{\partial p}{\partial x} dx$ a výraz $\frac{dv}{dt}$ představující zrychlení, kde $\vec{v}' = v(x(t), t)$ rozepíšeme na

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial v}{\partial t} \frac{dt}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x}.$$

Po dosazení zpět do pohybové rovnice a následným vydělením výrazem $\rho S dx$ dostaneme

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}.$$

b. *Rovnice kontinuity* – protože se vlnění šíří jen ve směru osy x , je $\vec{v} = (v, 0, 0)$ a

$$\text{div}(\rho \vec{v}) = \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = \rho \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial x}.$$

Rovnice kontinuity tak přechází na tvar $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0$.

c. *Stavová rovnice* – pro adiabatický proces platí $pV^\kappa = k$, kde $V = \frac{m}{\rho}$ je objem daného elementu, k je konstanta. Vyjádříme-li z této rovnice tlak, dostáváme následující vztah $p = C\rho^\kappa$, kde konstanta $C = \frac{k}{m^\kappa}$. Derivováním rovnice pro tlak dostaneme

$$\frac{\partial p}{\partial \rho} = C\kappa\rho^{\kappa-1} = \kappa \frac{p}{\rho}.$$

Nyní zavedeme tzv. relativní změnu hustoty s ve zvukové vlně, která je dána vztahem $s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$. Hodnoty p_0 , ρ_0 jsou hodnoty tlaku a hustoty pro nulovou rychlost pohybu elementu. Hustota ρ vyjádřená z tohoto vztahu je pak rovna $\rho = \rho_0(1 + s)$. Tuto rovnici upravíme na tvar $\frac{d\rho}{\rho} = \frac{ds}{1+s}$ a za předpokladu, že $s \ll 1$ převedeme na tvar $\frac{d\rho}{\rho} \approx ds$.

Dále předpokládáme, že rychlost elementu je relativně malá (blízká nule). Pohybová rovnice pak přechází na tvar $\frac{\partial v}{\partial t} \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$ a rovnice kontinuity má tvar $\frac{\partial v}{\partial x} \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t}$.

Vezmeme-li v úvahu, že $p = p(\rho(x))$, můžeme dále rovnice upravovat

$$\frac{\partial v}{\partial t} \approx -\frac{1}{\rho} \left(\frac{dp}{d\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) \approx -\kappa \frac{p_0}{\rho_0} \frac{\partial s}{\partial x}.$$

Dále lze psát $\frac{\partial v}{\partial x} \approx -\frac{\partial s}{\partial t}$. Poslední dvě rovnice tvoří soustavu rovnic. Abychom je mohli dále upravovat, musíme nejprve první z rovnic derivovat podle x a druhou podle t . Po této úpravě máme:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 v}{\partial t \partial x} &\approx -\kappa \frac{p_0}{\rho_0} \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t} &\approx -\frac{\partial^2 s}{\partial t^2}. \end{aligned}$$

Porovnáním rovnic obdržíme vlnovou rovnici ve tvaru

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 s}{\partial x^2},$$

kde $c = \sqrt{\kappa \frac{p_0}{\rho_0}}$ je rychlost šíření vlnění.

Literatura

- [1] Holubová, R.: Úvod do fyzikálních měření I. – II. Skriptum, VUP Olomouc 1998.
- [2] Halaš, R.: Model interakcí (dostupné online http://ufm.sgo.cz/ke_stazeni.php).
- [3] Štoll, I.: Mechanika. Skriptum FJFI ČVUT, Praha 2010.
- [4] Vybíral, B.: Fyzika jako věda sjednocující přírodní vědy, projekt INKOV.
<http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/>
- [5] Příklady užití parciálních diferenciálních rovnic ve fyzice.
(dostupné on-line http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kat_fyz/externi/kat_fyz_0062/kapitola2.pdf)
- [6] <http://www.fyzika.net/>
- [7] <http://www.converter.cz/>

Renata Holubová

Integrovaný kurs fyziky

Výkonný redaktor prof. RNDr. Tomáš Opatrný, Dr.
Odpovědná redaktorka Mgr. Lucie Loutocká
Technická úprava textu doc. RNDr. Oldřich Lepil, CSc.
Návrh obálky Jiří Jurečka

Vydala a vytiskla Univerzita Palackého v Olomouci
Křížkovského 8, 771 47 Olomouc
<http://www.upol.cz/vup>
e-mail: vup@upol.cz

Olomouc 2012

1. vydání

Publikace neprošla ve vydavatelství redakční a jazykovou úpravou.

Neprodejné

ISBN 978-80-244-3382-0