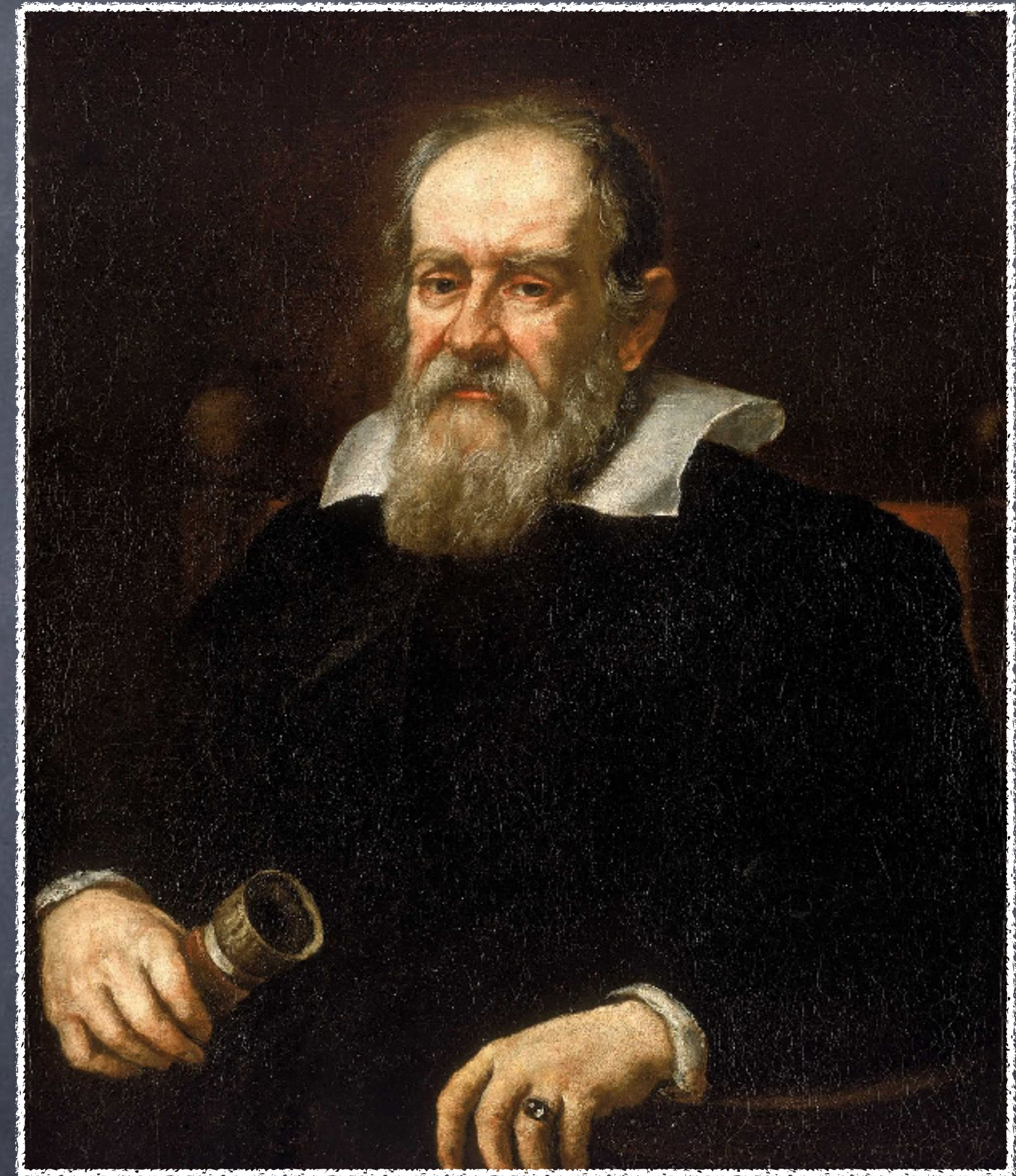


Najväčší Galileov objav

čo je fyzika

mechanika 2

Galileo Galilei (1564-1642)
objavil pohoria na Mesiaci,
škvrny na Slnku, fázy Venuše,
mesiace Jupitera, niečo pri
Saturne, hviezdy v Mliečnej
dráhe, princíp relativity,
zákon zotrvačnosti, zákon
voľného pádu, ale nič z toho
nebolo jeho najväčším
objavom. Jeho najväčším
objavom bol objav fyziky.



súčasníci

William Shakespeare, Peter Paul Rubens, kardinál Richelieu, šogun Tokugawa, Pocahontas

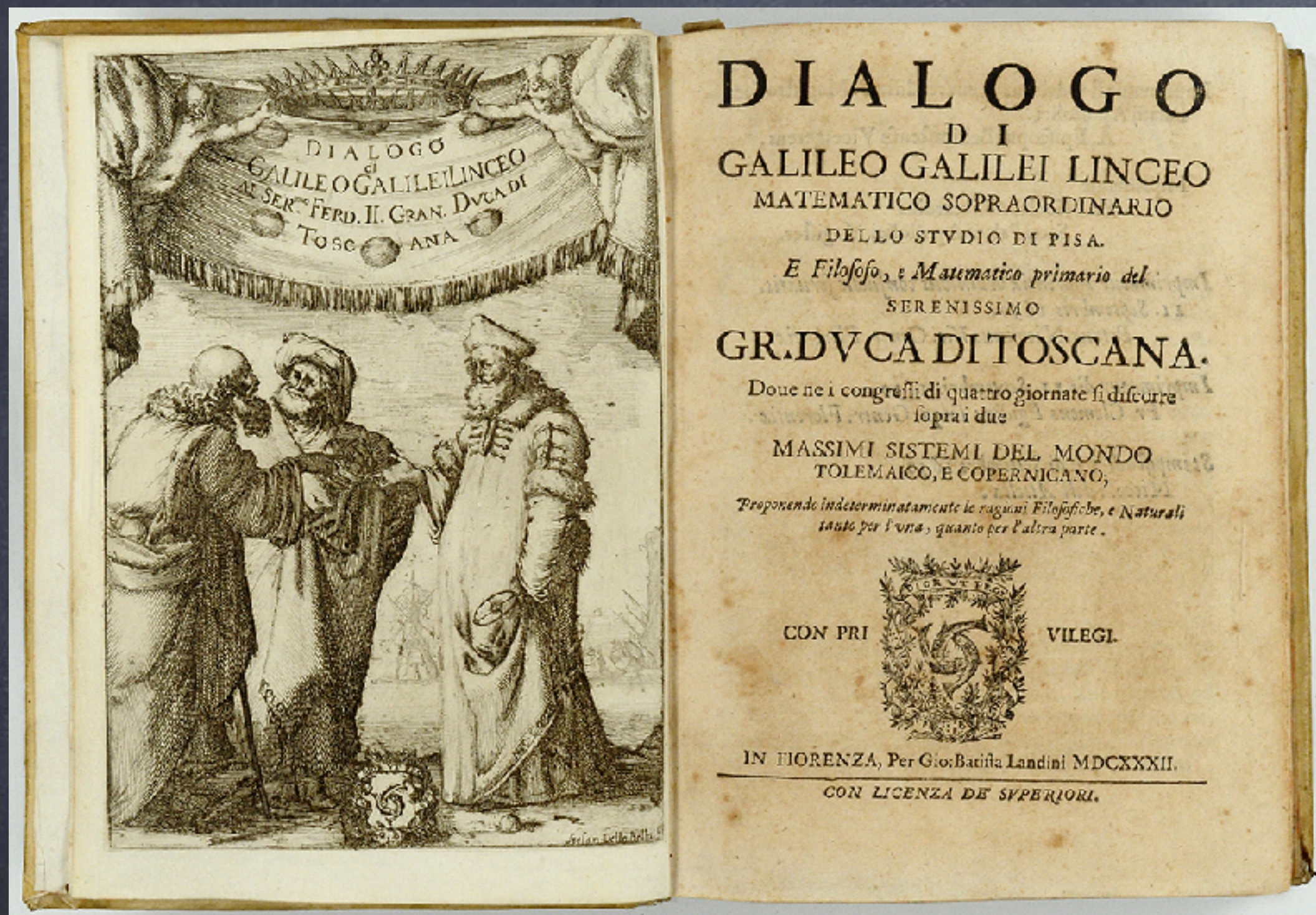
Piazza dei Miracoli, Pisa

Kyvadlo

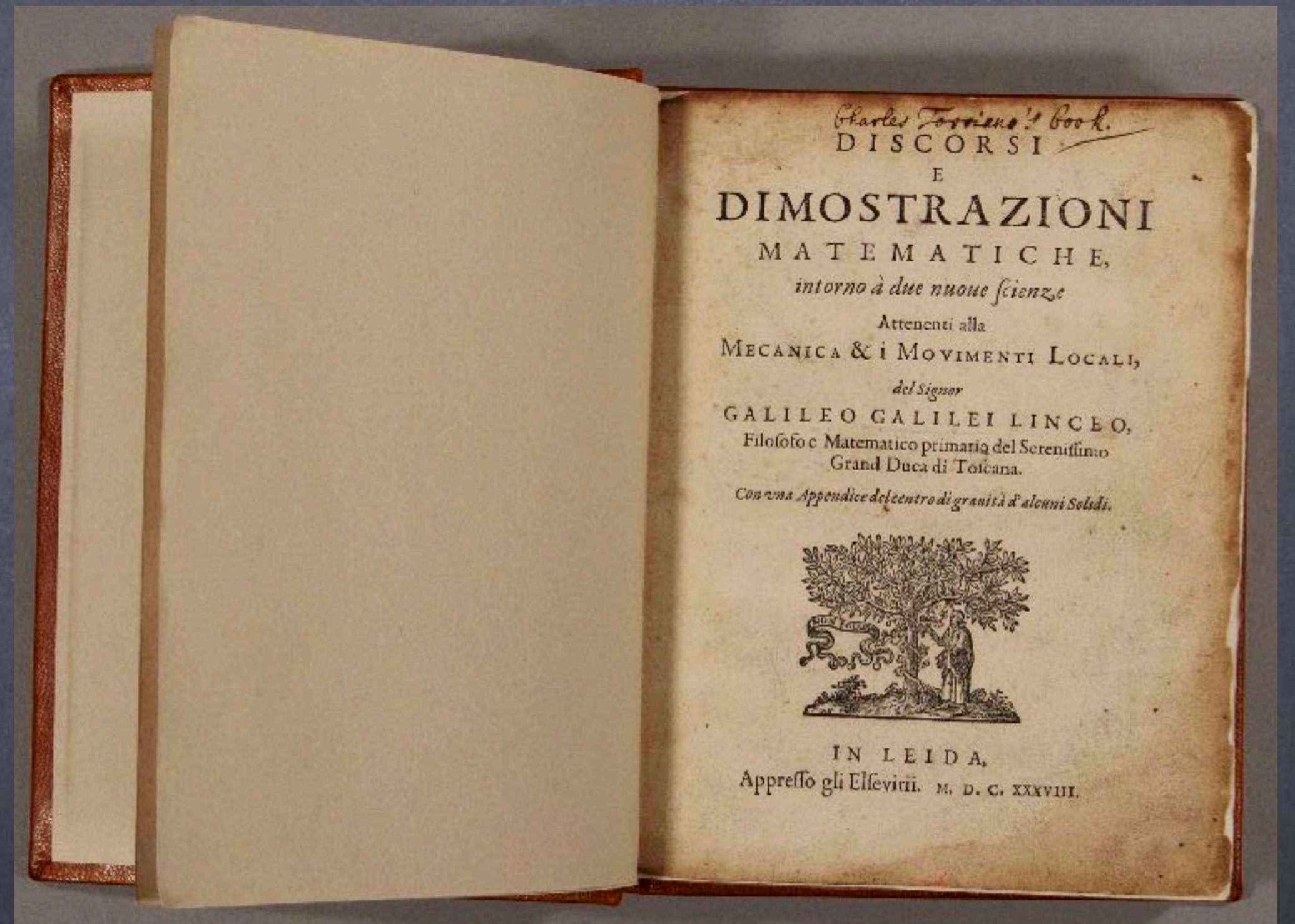
Volný pád



Dve důležité knihy



Dialog o dvoch systémoch sveta
táto je slávnejšia



Rozpravy o dvoch nových vedách
o tejto bude reč

17-ročný Galileo a kyvadlo

- Pozorovanie kývajúceho sa lustra počas bohoslužby
- Prekvapenie: perióda nezávisí od amplitúdy
(zmeny amplitúdy asi kvôli rôznej intenzite prievanu, čas asi najprv len ako rytmus, potom meraný tepom)
- Prečo prekvapenie? Porovnajme s voľným pádom.
Tam by analogickým javom bol pád z rôznych výšok za rovnaký čas. A to by bolo fakt prekvapko.

pozorovanie a experiment

- Experiment: cielene pripravená situácia, kde mám všetko podstatné pod kontrolou a meraním viem získavať číselné výsledky
- Galileove experimenty (kliniec, lanko, guľička):
 - Porovnáva stovky kmitov dvoch kyvadiel naraz (nemusí merať čas, ktorý dosť presne merať nevie)
 - zostávajú synchronizované pri rôznych amplitúdach
 - zostávajú synchronizované pri rôznych hmotnostiach

matavié pouaučenia

- Experiment zist'uje veci presnejšie ako pozorovanie
- Často sa to deje na hranici meracích možností (ak neviem merať čas, musím to nejako obísť)
- Umožní mi spresniť veci, ktoré som pozoroval (nezávislosť periódy kmitov od amplitúdy)
- Umožní mi zistiť veci, ktoré som nepozoroval (nezávislosť periódy kmitov od hmotnosti)

porovnanie s voľným pádom

čas "pádu" od	počiatočnej výšky	hmotnosti
pri kyvadle (Galileo)	nezávisí	nezávisí
pri voľnom páde (Aristoteles)	závisí	závisí



toto sa ale Galileovi nepáčilo

Vacuo non si farebbe il moto, la posizione del Vacuo assolutamente presa, e non in relazione al moto, non vien destrutta, mà per dire quel che per auventura potrebbè rispondere quegli antichi, acciò meglio si scorga, quanto concluda la dimostrazione d' Aristotele, mi par che si potrebbe andar contro à gli affunti di quello, negandogli amendue. E quanto al primo: io grandemente dubito, che Aristotele non sperimentasse mai quanto sia vero, che due pietre vna più graue dell' altra dieci volte lasciate nel medesimo instante cader da vn altezza, v. gr. di cento braccia fusser talmente differenti nelle lor velocità, che all' arriuo della maggior in terra l' altra si trouasse non hauere nè anco sceso dieci braccia.

Simp. Si vede pure dalle sue parole, ch' ei mostra d' hauerlo sperimentato, perche ei dice: Veggiamo il più graue: hor quel veder si accenna l' hauerne fatta l' esperienza.

Sagr. Mà io S. Simp. che n' hò fatto la proua, vi assicuro, che vna palla d' artiglieria, che pesi cento, dugento, e anco più libbre, non anticiperà di vn palmo solamente l' arriuo in terra della palla d' un moschetto, che ne pesi vna mezza, venendo anco dall' altezza di dugento braccia.

Salu. Mà senz' altre esperienze con breue, e concludente dimostrazione possiamo chiaramente prouare non esser vero, che vn mobile più graue si muoua più velocemente d' un' altro men graue, intendendo di mobili dell' istessa materia; & in somma di quelli de i quali parla Aristotele. Però ditemi S. Simp. se voi ammettete, che di ciascheduno corpo graue cadente sia vna da natura determinata velocità, si che l' accrescergliela, ò diminuirgliela non si possa se non con vsargli violenza, ò opporgli qualche impedimento.

Simp. Non si può dubitare, che l' istesso mobile nell' istesso mezzo habbia vna statuita, e da natura determinata velocità, la quale non se gli possa accrescere se non con nuouo impeto conferitogli, ò diminuirgliela saluo che con qualche impedimento che lo ritardi.

Salu. Quando dunque noi haessimo due mobili, le naturali velo-

Simplicio (aristotelian)

Podľa Aristotela telesá rôznej váhy sa v rovnakom prostredí hýbu rôznymi rýchlosťami, ktorých vzájomný pomer je rovnaký ako pomer ich váh. Takže teleso desaťkrát ťažšie ako iné teleso sa bude pohybovať desaťkrát rýchlejšie.

Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze
attinenti alla meccanica e movimenti locali

Sagredo (neustranný)

Ale ja, drahý Simplicius, som to otestoval
a môžem ťa uistiť, že delová guľa vážiaca
sto alebo dvesto libier, alebo aj viac,
nedopadne na zem o toľko skôr ako
mušketová guľka vážiaca pol libry, ak ich
obidve pustíš z rovnakej výšky dvesto lakt'ov.

Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a duo nuove scienze
attenenti alla mecanica e movimenti locali

Salviati (galileovec)

Ak vezmeme dve telesá, ktorých prirodzené rýchlosti sú rôzne, potom je jasné, že ak ich spojíme, rýchlejšie teleso bude čiastočne spomalené pomalším a pomalšie čiastočne zrýchlené rýchlejším. Ale dva spojené kamene vytvoria spolu kameň ešte väčší než bol väčší z pôvodných kameňov. Takže ťažšie teleso sa pohybuje pomalšie ako ľahšie teleso, v spore s vaším predpokladom.

Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze
attinenti alla meccanica e movimenti locali

morálne poučenia

- Nie vždy je rozumné slepo dôverovať autoritám.
- Ak teória hovorí niečo iné ako (bezchybný) experiment, treba ju zavrhnuť.
- Ak je teória vnútorne nekonzistentná (vedie k sporu), treba ju zavrhnuť.

Ako vlastne prebieha voľný pád?

- Mení sa jeho rýchlosť?
- Akým spôsobom sa mení?
- Vieme to zistiť pozorovaním?
- Vieme to zistiť nejako inak?

MOTU LOCALI.

DE subjecto vetustissimo novissimam promovemus scientiam. MOTU nil forte antiquius in Natura; & circa eum volumina nec pauca, nec parva à Philosophis conscripta reperiuntur. Symptomatum tamen, quæ complura, & scitu digna insunt in eo adhuc inobservata, necdum indemonstrata comperio. Leviora quædam adnotantur: ut gratia exempli, naturalem motum gravium descendentium continue accelerari. Verum juxta quam proportionem ejus fiat acceleratio, proditum hucusque non est: nullus enim, quod sciam, demonstravit, spatia à mobili descendente ex quiete peracta in temporibus æqualibus eam inter se retinere rationem, quam habent numeri impares ab unitate consequentes. Observatum est, missilia, seu projecta, lineam qualitercunque curvam designare; veruntamen eam esse Parabolam nemo prodidit. Hæc ita esse, & alia non pauca, nec minus scitu digna, à me demonstrabuntur: & quod pluris faciendum censeo, aditus, & accessus ad amplissimam, præstantissimamque scientiam, cujus hi nostri labores erunt elementa, recludet: in qua ingenia meo perspicaciora abditiores recessus penetrabunt.

Tripartito dividimus hanc tractationem. In prima parte consideramus ea quæ spectant ad Motum æquabilem, seu uniformem. In secunda de Motu naturaliter accelerato scribimus. In tertia de Motu violento, seu de projectis.

pozoruhodné pozorovanie

- Pozorovaním nezistíme o rýchlosti voľného pádu takmer nič. (Nevidno ani len to, či je pohyb nejako zrýchlený.)
- Isté prejavy zrýchlenia môžeme pozorovať nepriamo. (Väčšiu jamku v piesku zanechá guľička po dopade z väčšej výšky. Zrejme preto, lebo má väčšiu rýchlosť.)
- Galileov postup: skúsím nejakú hypotézu, preskúmam jej dôsledky, a tie sa potom pokúsím experimentálne potvrdiť alebo vyvrátiť

prvá hypotéza (mladý Galileo)

- Rychlost' je úměrná přejdenej vzdialenosti.
- Táto hypotéza však vedie rýchlo k sporu:
Nech $v = k \cdot h$ a pre jednoduchosť nech $k = 1$.
Za aký čas prejde teleso prvý meter?
Kým neprejde 1m, má rýchlosť' $< 1 \text{ m/s}$.
Druhú polovicu metra teda prejde za $> 0.5 \text{ s}$.
Kým neprejde 0.5m, má rýchlosť' $< 0.5 \text{ m/s}$.
Druhú štvrtinu metra teda prejde za $> 0.5 \text{ s} \dots$
Celkove mu prvý meter trvá nekonečne dlho.
To je ale v spore s tým, čo pozorujeme.

∴
 $> 0.5 \text{ s}$

$> 0.5 \text{ s}$

$> 0.5 \text{ s}$



druhá hypotéza (starší Galileo)

- rychlost' je úměrná uplynutému času $v = a \cdot t$
- přejetá dráha = průměrná rychlost' · čas
- průměrná rychlost' = průměr počáteční a konečné
 $= 1/2 (0 + a \cdot t)$
- čiže

$$s = \frac{1}{2} a t^2$$

Jemnosti odvodenia

- priemerná rýchlosť = priemer počiatočnej a konečnej (toto neplatí pre každý pohyb)
- Aká je napríklad priemerná rýchlosť v prípade, že prvú polovicu času teleso rovnomerne zrýchľovalo a druhú polovicu času už rýchlosť nemenilo?
- Prečo to pre rovnomerne zrýchlený pohyb platí? (Galileo to formuluje ako teorému s dôkazom.)

úplne nepovinná domáca úloha

Kto chce, môže si sám prečítať
Galileovu argumentáciu k tejto
veci. Je na stranách 169-170
originálneho vydania.
(Asi lepšie bude neskôr vydané
anglické vydanie, ktoré sa dá
ľahko nájsť na nete.)

170

DIALOGO TERZO

tibus temporis AB maximus & ultimus representetur per E
 B , utcumque super AB constituta: junctæque AE lineæ, om-



nes ex singulis punctis lineæ AB ipsi
 BE æquidistanter actæ crescentes
velocitatis gradus post instans A re-
presentabunt. Divisa deinde BE
bifariam in F , ductisque parallelis FG ,
 AG , ipsis BA , BF ; Parallelogram-
mum $AGFB$ erit constitutum trian-
gulo AEB æquale, dividens suo la-
tere GF , bifariam AE in I : quod-
si parallelæ trianguli AEB usque ad
 ICF extendantur, habebimus ag-
gregatum parallelarum omnium in
quadrilatero contentarum æqua-
lem aggregatui comprehensarum in
triangulo AEB . quæ enim sunt in
triangulo IEF , paria sunt cum con-
tentis in triangulo GIA ; cæ vero
quæ habentur in trapezio $AIFB$,

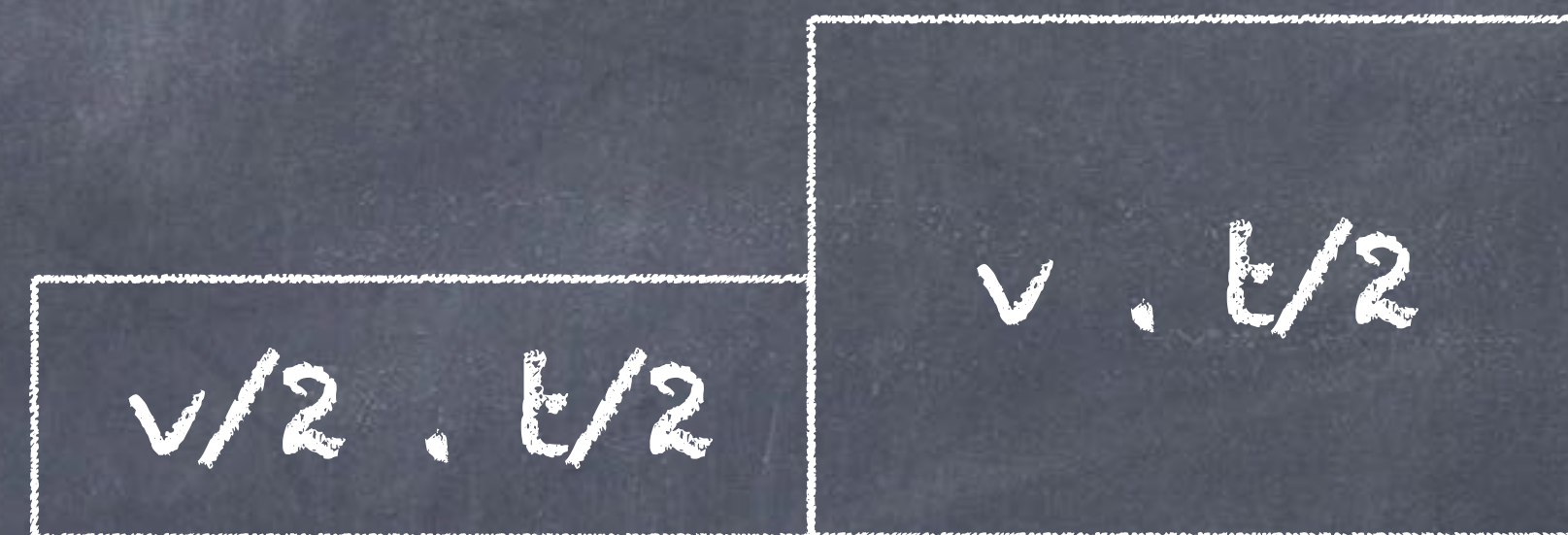
communes sunt. Cumque singulis & omnibus instantibus
temporis AB respondeant singula & omnia puncta lineæ AB ,
ex quibus actæ parallelæ in triangulo AEB comprehensæ
crescentes gradus velocitatis adactæ representant; paralle-
læ vero intra parallelogrammum contentæ totidem gradus
velocitatis non adactæ, sed æquabilis, itidem representent:
apparet totidem velocitatis momenta absumpta esse in mo-
tu accelerato juxta crescentes parallelas trianguli AEB , ac
in motu æquabili juxta parallelas parallelogrammi GB : quod
enim momentorum deficit in prima motus accelerati me-
diate, (deficiunt enim momenta per parallelas trianguli
 AGI representata,) reficitur à momentis per parallelas
trianguli IEF representatis. Patet igitur, æqualia futura esse
spatia

morálne poučenia

- Ani géniovia nemajú len samé dobré nápady ($v = k.s$)
- Zlé nápady je dobré vedieť odhaliť a odhodiť.
- Nie všetko sa dá zistiť pozorovaním a experimentom.
- Je rozumné skúšať rôzne hypotézy a skúmať ich dôsledky. V tomto sú nenahraditeľnými nástrojmi logika a matematika.

iné odvodenie

- Polovica času rýchlosť $v/2$, druhá polovica rýchlosť v
 $s = v/2 \cdot t/2 + v \cdot t/2$

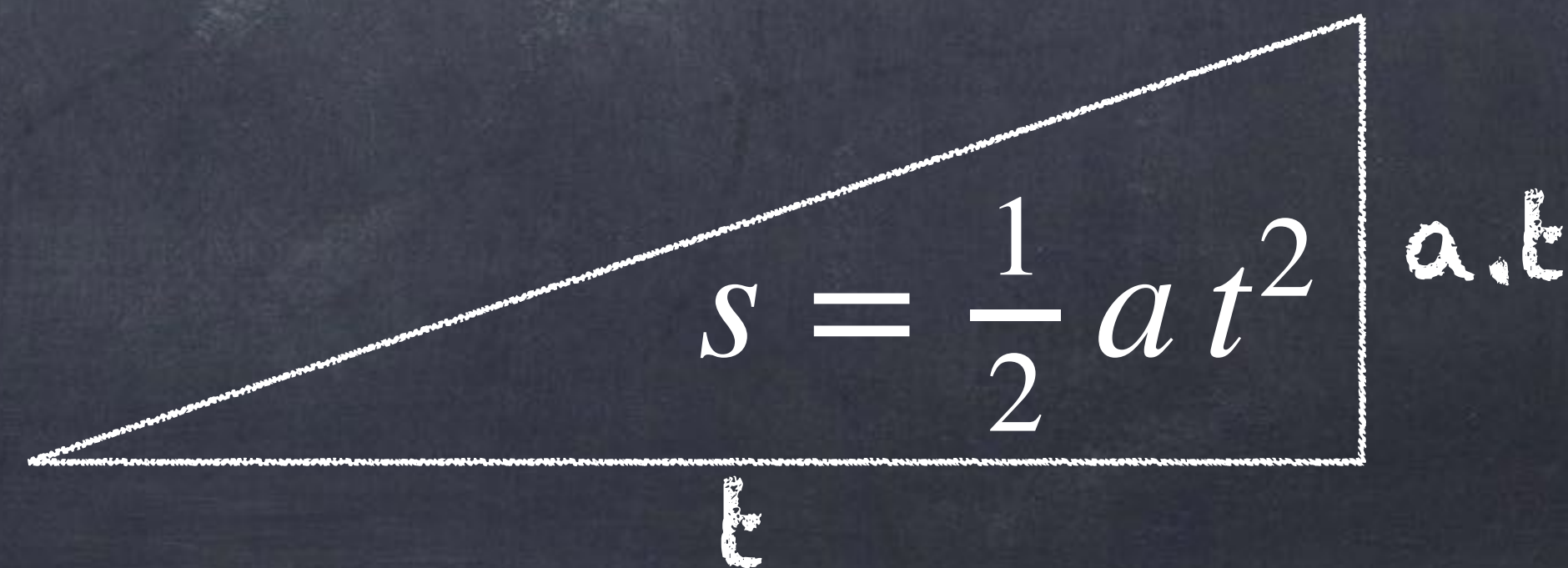


- Analogicky so štvrtinami času



- .
- .
- .

- Rovnomerne sa meniaci rýchlosť



základná otázka

- No fajn, tak vieme koľko prejde teleso za nejaký čas, ak sa pohybuje rovnomerne zrýchlene. Ale čo nám to hovorí o voľnom páde? Odkiaľ vieme, či je voľný pád naozaj rovnomerne zrýchlený pohyb? Respektíve, či by bol, keby nepôsobil odpor vzduchu?
- Na toto sa zrejme dá odpovedať len experimentom. Treba jednoducho odmerať, koľko trvá voľný pád z rôznych výšok. Lenže to také jednoduché nie je.

základný problém



toto sú stopky
17. storočia

Galileovo riešenie



spomalený film
(naklonená rovina)

púšťal guľičky,
aby znížil trenie



zrýchlené stopky
(deravé vedro s vodou)

vodu vážil,
aby zvýšil presnosť

výsledky

- Dráha guľky na naklonenej rovine je priamo úmerná druhej mocnine času.
- Predpoklad o rovnomernom zrýchlení pri voľnom páde sa teda podarilo prinajmenšom nepriamo potvrdiť.
- To stačilo na presvedčenie mnohých, hoci nie všetkých (napr. Descartes tomu neveril)



Giuseppe Bezzuoli, 1839

hlavné ponaučenia

- Vedecké experimentovanie sa často deje na hranici meracích možností, pričom bežne treba tieto možnosti zvýšiť vylepšením prístrojov a/alebo meracích metód.
- Ak sa teoretická predpoveď nedá experimentálne overiť priamo, sú cenné aj nepriame overenia.
- Niekedy je ťažké presvedčiť iných, a to aj vtedy, keď máte pravdu.

d'alší nečakaný objav

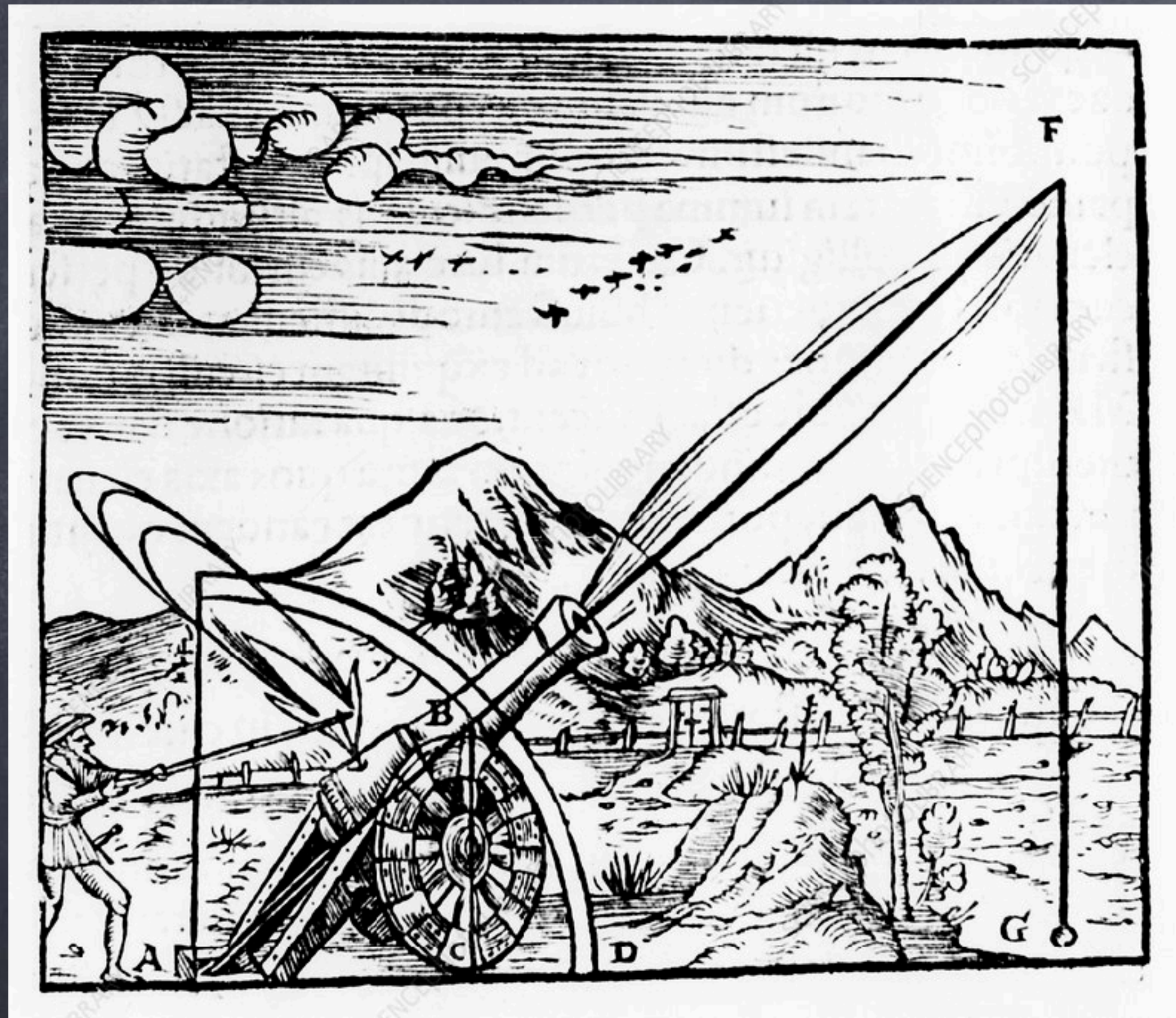
- ak za naklonenú rovinu umiestnime druhú, opačne naklonenú rovinu, guľička vybehne do takej výšky, z akej svoj pohyb začala (toto hovorí experiment)
- Ak bude uhol druhej naklonenej roviny menší, dostane sa do väčšej vodorovnej vzdialenosti (aj toto je experimentálny fakt)
- Ak bude uhol druhej naklonenej roviny nulový, pôjde zrejme donekonečna (ak ju nezastaví trenie)
- Galileov zákon zotrvačnosti: v horizontálnom smere, v ktorom nepôsobí gravitácia, sa v prípade bez trenia telesá pohybujú stále rovnakou rýchlosťou



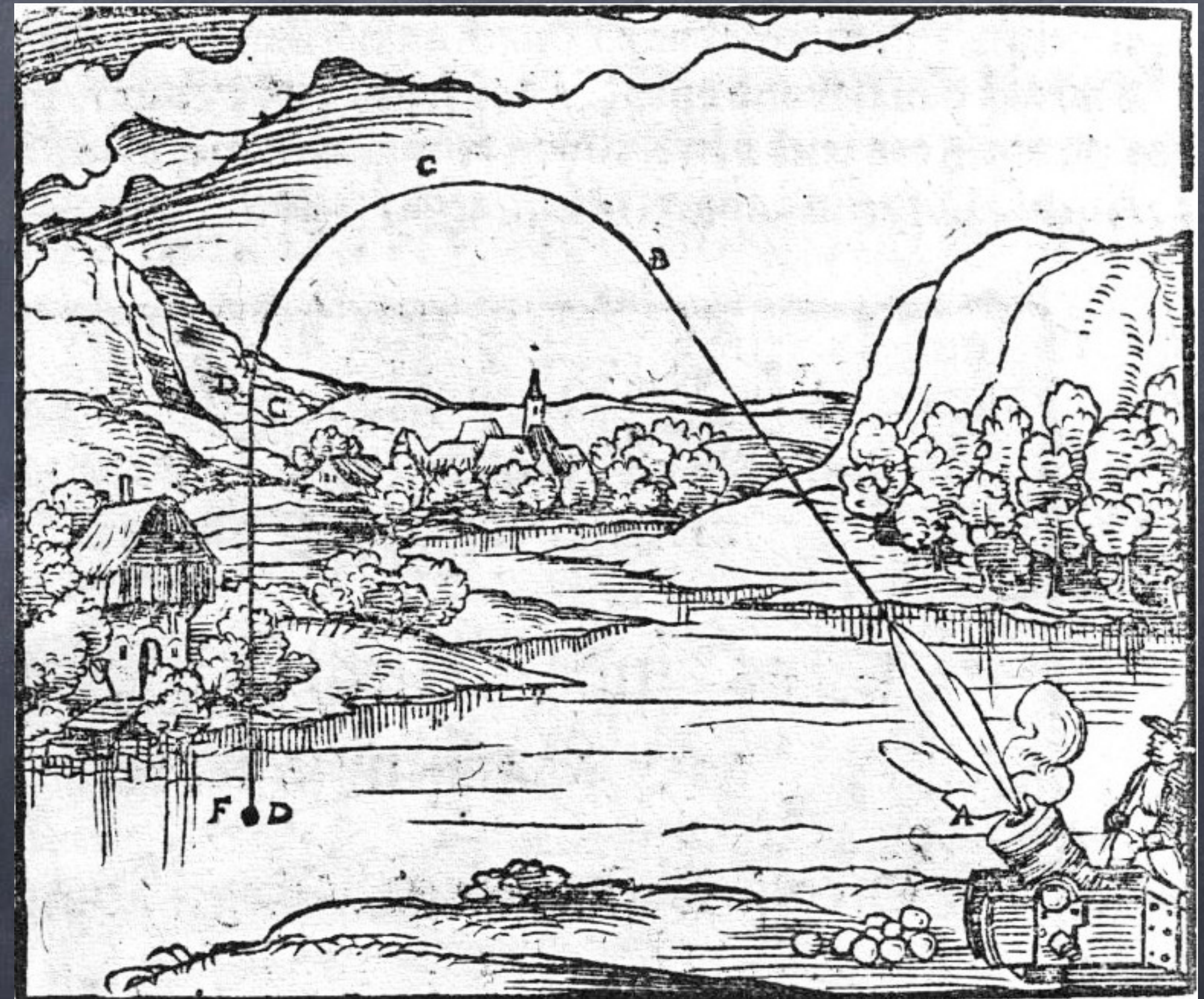
silný dôsledok: vrhy

- V horizontálnom smere rovnomerný pohyb
- Vo vertikálnom smere rovnomerne zrýchlený pohyb
- Kombinácia týchto dvoch pohybov: parabola
zdôvodnenie: $x \sim t$ a $z \sim t^2$, čiže $z \sim x^2$ a grafom kvadratickej funkcie je parabola (toto by malo byť známe z matiky)
- Parabolickú trajektóriu hodeného telesa považoval vraj Galileo Galilei za svoj úplne najväčší vedecký objav (ktorý platí, ak sú trenie a odpor vzduchu zanedbateľné)

šikmý vrh pred Galileom



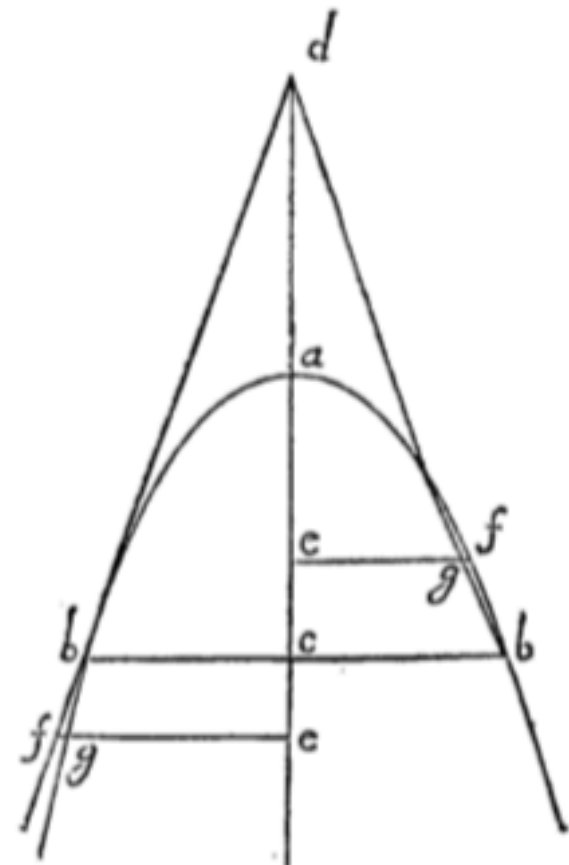
1561



1582

Šikmý vrh u Galilea

tro segandola sopra, ò prolungata segandola sotto. Et in essa sia preso qualsivoglia punto g per il quale passi la retta fg c. E perche il quadrato fc è maggiore del quadrato gc, maggior proporzione ha-



rà esso quadrato fc al quadrato bc, che'l quadrato gc al medesimo bc. E perche per la precedente il quadrato fc al quadrato bc stà come la ca alla ac, adunque maggior proporzione ha la ca alla ac, che'l quadrato gc al quadrato bc, cioè, che'l quadrato ed al quadrato dc. (essendo che nel triangolo dgc come la gc alla parallela bc, così stà ed a dc.) mà la linea ea alla ac, cioè, alla ad, ha la medesima pro-

porzione, che 4 rettangoli e ad a 4 quadrati di ad, cioè al quadrato cd (che è eguale a 4 quadrati di ad.) adunque 4 rettangoli e ad al quadrato cd hanno maggior proporzione che il quadrato ed al quadrato dc. adunque 4 rettangoli e ad saranno maggiori del quadrato ed: il che è falso, perche son minori: imperò che le parti e a, ad, della linea ed, non sono eguali. Adunque la linea db tocca la Parabola in b, e non la sega. il che si doneua dimostrare.

Simpl. Voi procedete nelle vostre dimostrazioni troppo alla grande; & andate sempre, per quanto mi pare, supponendo che tutte

Gr.		Gr.
45	10000	44
46	9994	43
47	9976	42
48	9945	41
49	9901	40
50	9845	39
51	9781	38
52	9704	37
53	9611	36
54	9511	35
55	9396	34
56	9271	33
57	9136	32
58	8989	31
59	8829	30
60	8659	29
61	8481	28
62	8290	27
63	8090	26
64	7880	25
65	7660	24
66	7431	23
67	7191	22
68	6944	21
69	6691	20
70	6431	19
71	6157	18
72	5878	17
73	5591	16
74	5300	15
75	5000	14
76	4694	13
77	4381	12
78	4067	11
79	3746	10
80	3420	9
81	3090	8
82	2756	7
83	2419	6
84	2079	5
85	1736	4
86	1391	3
87	1044	2
88	698	1
89	349	1

Gradius Elevationum.

Gr.		Gr.	
1	3	46	1171
2	11	47	1346
3	28	48	1523
4	50	49	1698
5	76	50	1868
6	108	51	2038
7	150	52	2207
8	194	53	2379
9	241	54	2546
10	301	55	2710
11	365	56	2873
12	431	57	3033
13	506	58	3190
14	581	59	3348
15	670	60	3501
16	760	61	3649
17	851	62	3796
18	951	63	3939
19	1060	64	4078
20	1170	65	4214
21	1285	66	4346
22	1401	67	4474
23	1517	68	4597
24	1635	69	4715
25	1756	70	4830
26	1871	71	4940
27	1991	72	5045
28	2104	73	5144
29	2221	74	5240
30	2339	75	5330
31	2453	76	5415
32	2570	77	5495
33	2687	78	5567
34	2801	79	5636
35	2919	80	5698
36	3036	81	5755
37	3151	82	5806
38	3271	83	5851
39	3391	84	5890
40	3511	85	5924
41	3631	86	5951
42	3747	87	5971
43	3854	88	5987
44	3961	89	5998
45	4000	90	10000

Tabula

irgavné pouučenia

- Skúmanie nejakých javov (napr. pohybu v zvislom smere) vedie často k celkom neočakávaným objavom týkajúcim sa iných javov (napr. pohybu vo vodorovnom smere)
- Základný výskum zdantivo nepraktických akademických problémov (napr. ako sa mení rýchlosť pri voľnom páde) môže viesť k významným praktickým aplikáciám (napr. k výraznému zlepšeniu presnosti delostrelectva, čo je veľmi užitočné, ak strieľajú naši)

slovo na záver

- Všetky mravné ponaučenia sa týkali jednak Galileových objavov a jednak celej fyziky
- Je naozaj fascinujúce, ako veľa z fyziky a jej metód sa dá ilustrovať na Galileových objavoch z mechaniky