

Erirelatiivsusteooria osatähtsus füüsikas ja tehnoloogias. Algosakestega seotud probleemid. Kiirendid. Aeg ja ruum arengus. Üldrelatiivsusteooria. Must auk.

Erirelatiivsusteooria.

Klassikaline mehaanika.

ERT on ruumi ja aega ühendav teooria. Vaataks esmalt lähemalt, mis oli enne ERT ruumi ja aega kirjeldavaks teooriaks ja mis oli sel teorial viga.

Vaatame näiteks 3D- või 2D-ruumi (aega ei arvesta!). Selleks, et kirjeldada ses ruumis toimuvaid sündmusi, liikumist, on vaja koordinaatsüsteemi. Matemaatikast teada nt ristkoordinaadid. Kahe punkti vaheline kaugus selles ruumis $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$. Kahe punkti vaheline kaugus ei sõltu sellest, kuidas me koordinaattelgi pöörame. Öeldakse, et kahe ruumipunkti vaheline kaugus on invariant (pöörete ja nihete suhtes). Samuti – vektori pikkus ei sõltu sellest, kuidas me koordinaattelgi pöörame või nihutame.

Võtame ka aja nüüd appi. Juba Galilei poolt tehtud asi. Oletame, et üks süsteem liigub teise suhtes mingi kiirusega V x -telje suunas. Tavanäide – üks inimene on rongis, teine raudtee kõrval. Rong liigub ühtlase kiirusega V . Mõlemad võivad valida taustsüsteemi sellise, et nemad on selles paigal. Mõlemad vaatavad, et nemad on paigal, aga see teine sell seal liigub mingi kiirusega. Selliseid koordinaatsüsteeme, mis liiguvad üksteise suhtes konstantse kiirusega, nim. inertsiaalseteks taustsüsteemideks (ITS). Seda, kuidas asukoht ühes ITS-s avaldub teise ITS-i koordinaatide järgi, kirjeldavad Galilei teisendused: $x' = x - vt$, $y' = y$, $z' = z$, $t' = t$, juhul kui liikumine toimub x -telje sihis. x -koordinaadid ITS-des erinevad, muud jäävad samaks. Ka aeg kulgeb mõlemas ITS-s ühtemoodi. Inimesed vananevad ühtemoodi, supp läheb sama ajaga keema... sõltumata sellest, kas seda supipotti vaatab rongis olev inimene või kõrvalt vaatlev. Galilei teisenduste korral toimuvad sündmused kõigis ITS-des samaaegselt, st kivi kukkumine vette registreeritakse kõikides ITS-des samaaegseteks. Kui kaks kivi kukuvad vette samaaegselt ühes ITS-s, siis juhtub see nii ka teises.

Mis neist ITS-des on sarnast, mis erinevat? Ilmselt kiirused. $v' = v_1 + V$ Nt, rong sõidab kiirusega 60 km/h, inimene selles kõnnib 5 km/h, siis rongis istuva vaatleja suhtes liigub inimene kiirusega 5 km/h, paigalseisva suhtes 65 või 55 km/h, sõltuvalt suunast. Seega, kiirused on suhtelised. Milline on ülesvisatud palli trajektoriaal? Ühel juhul sirge, teisel parabool! Peabki nii olema – koordinaatsüsteemid ei ole samad. Aga palli lennuaeg on sama.

Mis veel on sama? Samaks jäävad näiteks mõjuvad jõud. Newtoni teine seadus kehtib mõlemas ühtemoodi. Kui ühes ITS-s mõjuv jõud on 50N, siis on see ka suvalises teises ITS-s niimoodi. Sama ka Newtoni I ja III seadusega. St, vähemalt mehaanika seadused on ITS-des ühesugused. $F = ma = ma'$. Impulsi jäävuse seadus, mehaanilise energia jäävuse seadus – need näevad mõlemal juhul samasugused välja. Kui ühes süst-s on energia jääv, on seda ka suvalises teises ITS-s.

Klassikaline (Galilei) relatiivsuspriprintsip: mehaanika katsetega ei saa teha vahet, kas süsteem liigub ühtlaselt (st ühtlase kiirusega) või on paigal, teisisõnu – ei leidu ühtegi eelistatud taustsüsteemi. (Mõne taustsüsteemi abil on lihtsam kirjeldada liikumist, aga see on teine asi).

Probleemid klassikalise mehaanikaga. Elektromagnetism ja Galilei teisendused.

James Clark Maxwell formuleeris võrrandid, mis kirjeldavad elektri- ja magnetvälja ning elektromagnetisminähtusi üldisemalt, 1860.-70.ndatel (1867). Ühtlasi tulenes neist võrranditest, et elektromagnetväli levib lõpliku kiirusega. Selleks kiiruseks on valguse kiirus. Loomulik, ka valguskiirgus on elektromagnetkiirguse üks eri liike. Maxwelli teorial oli puudus, st sel ajal loeti seda puuduseks – Maxwelli teooria ei olnud invariantne Galilei teisenduste suhtes. St elektromagnetilist päritolu jõud ei olnud erinevates ITS-des ühesugused - elektromagnetismi seadused näevad erinevates ITS-des erinevad välja.

Üks vastuolu näitena. Liikuva süsteemi korral (valgusallikas liigub) näeb paigalseisvas süsteemis asuv vaatleja Galilei teooria kohaselt, et valgus liiguks kas kiirusega $c+v$ või $c-v$ vastavalt. Aga Maxwelli pani oma teooria paika selliselt, et valgus liiguks kõikjal ühe ja sama kiirusega.

Aga võib-olla ongi nii, et leidub mingi eelistatud ITS, nõ absoluutne taustsüsteem, milles peakski kõiki füüsika seadusi kirjeldama, mille suhtes liikumist vaatlema jne?

Valguse lainelise iseloomu kirjeldamiseks oli toodud abiks selline mõiste nagu 'eeter'. Idee - heli levib keskkonnas lainetena – õhu kokkusurumised ja hõrendused, sarnaselt vajab ka valgus levimiseks mingit keskkonda. 19.sajandi alguses ja keskel oli selline asi, et valgus ei vaja levimiseks mingit keskkonda, terve mõistuse ja senise füüsikaga vastuolus. Eeter on selline keskkond, milles levib valgus, kuid eeter ise ei mõjuta näiteks taevakehade liikumist, ei ole neile mingiks takistuseks. Ehk just see absoluutne TS ongi see, mis on eetri suhtes paigal. Maa ilmselt selle suhtes paigal pole. Viimane idee tugines järgmisel katsel.

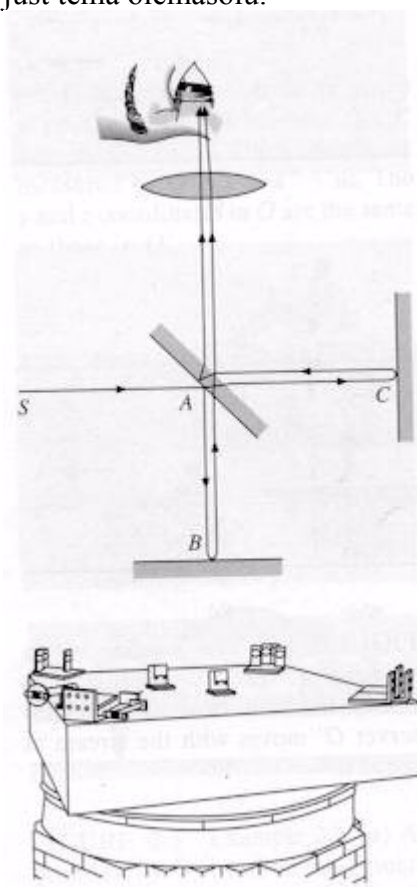
Juba aastal 1728 oli teada, et tähtede asukoht taevas aasta jooksul pisut muutub. Põhjus – teleskoop liigub koos Maaga 30km/s, samal ajal – vaadates tähti – ka valgus liigub teleskoobis mingi aja. (joonis). $\theta = \frac{30}{300000} = 10^{-4} \text{ rad}(20'')$. Kuus kuud hiljem

toimub nihkumine vastupidises suunas, st tähe asukoht taevas võib muutuda 2θ . Kui valgus liigub eetris ja Maa liigub sellega kaasa, st Maa liikumiskiirus eetri suhtes on 0, siis kõrvalekallet ei saa olla. Sellest ka järeldus, et Maa liigub läbi eetri, Maa ei ole selline mingi objekt.

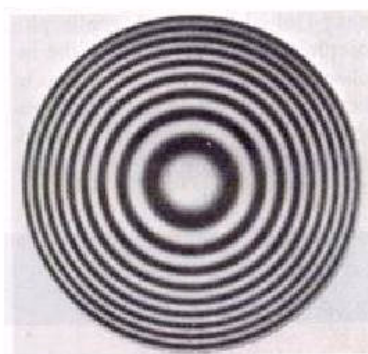
Michelson ja Morley üritasid leida Maa liikumiskiirust eetri suhtes, st leida, millises suunas ja kui palju liigub valgus vastu eetri liikumise kiirust ja millal pärikiirust. Selleks kasutati interferomeeterit. Interferomeetrit saab kasutada näiteks selleks, et näidata – ühtepidi liikudes kulub valgusel rohkem aega (tee on pikem, kui päris täpne olla – optiline teepikkus on pikem). Nt – võrdlus – kui paat sõidab kiirusega 5m/s km/h järvel (voolukiirust pole) edasi tagasi vahemaa 100m, siis kulutab ta selle peale aega – 40 s. Kui aga liigub jões, mille voolukiirus on 1 m/s alla- ja siis ülesvoolu, 100m, kulub aega $25+16,6s \approx 41,6$ s. Selle võrdluseks oleks jões risti ja pikisuunaline

liikumine (ristiliikudes selline eeldus, et vool ei vii paati kaasa, st ristipidi kaasaviimine pole oluline, uurime, milline aeg kulub ühet kaldalt teisele ja tagasi sõiduks, mitte ilmingimata samas paigas maabumiseks. Interferomeetriga saame võrrelda erinevaid teid pidi tulnud valguse 'läbitud teepikkusi' ehk 'selleks kulunud aega'.

Tagasi Michelson-Morley katse juurde – teeme katse ühes suunas (valgus peegeldub palju kordi, - mida pikem on optiline teepikkus, seda suurem täpsus), siis keerame kogu seadet. Juhul, kui eeter mingi suunas viib valguse kaasa, siis peab interferentspilt muutuma. Seda ei juhtunud. Katset korrati pooleaastase vahega. Sama tulemus. Seda eksperimenti on nimetatud ka üheks suuremaks (olulisemaks) eitava tulemuse andnud katseks. Eetri olemasolu lükati puhtalt ümber, kuigi mindi tõestama just tema olemasolu.



1a



1b

Joonise 1a ülemisel osal on näha skeem – S – valgusallikas, A – kaksikpeegel, osa valgusest peegeldub peeglist B, teine osa peeglist C. Silm fikseerib peeglitest B ja C tulnud ning läätse abil koondatud liitvalguse (parem on seda küll mingil ekraanil vaadata). Valguste liitumisel tekkinud ringide raadiused (joonis 1b) sõltuvad sellest, milline on teepikkuste AB ja AC erinevus. Michelson-Morley katses kasutati tegelikult mitmekordselt peegeldatud valgust (teepikkuste erinevuste määramine on täpsem). Kui eetri eksistentsi hüpotees kehtiks, peab süsteemi keeramisel tekkima teistsugune interferentspilt.

Seega, sellist erilist taustsüsteemi, mille suhtes kõiki liikumisi, füüsika seadusi vaadata, ei leidu. Et aga seetõttu ka Galileo relatiivsusprintsip elektromagnetismi teoorias ei kehtinud, oli üks frustrueeriv fakt.

Albert Einstein 'tühistas' Galilei relatiivsuspriinitsiibi ja postuleeris selle asemele uue relatiivsuspriinitsiibi. Seda juba mitte ainult mehaanika, vaid kõigi füüsikaseaduste jaoks:

- 1) ei leidu eelistatud või absoluutset ITS-i, kõik ITS-s on samaväärsed kõigi füüsikaseaduste kirjeldamise jaoks; (erinevus Galilei rel.priinitsiibist – kõik füüsikaseadused!);
- 2) valguse kiirus vaakumis on sama kõigi ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuvate vaatlejate jaoks ja on sõltumatu allika kiirusest. Tema väärtus on universaalne konstant c , mis on antud Maxwelli võrranditega.

Järeldused:

- 1) Maxwelli elektromagnetismi teooria on juba invariantne koordinaatseisenduste suhtes, st ta on juba relativistlik (Einsteini mõttes). St, erirelatiivsusteooriat kasutame tegelikult kõikjal, kus on tegemist elektromagnetismi nähtustega – kiirguse levik, valguse teke, peegeldumine jne).
- 2) Mehaanikas tuleb välja mõelda uus teisendus kiiruste liitmiseks ja koordinaatide teisendamiseks.

$$x' = \gamma(x - \beta ct); y' = y, z' = z; ct' = \gamma(ct - \beta x). \text{ (Pööre ümber } yz\text{-tasandi).}$$

Sellise teisenduse korral kahe ruumipunkti vaheline kaugus jääv ei ole. Jääv on aga kahe 4-ruumi punktide vaheline kaugus intervall 4-ruumis: Olgu üks meil koordinaatide alguspunktis, teise koordinaadid x, y, z, ct , siis $s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$. Nüüd hakkavad peale kauguste muutuma ka ajad. Ntx palli üles viskamisel ühes taustsüsteemis oli viskamiskoht ja kukkumiskoht samade koordinaatidega. Teises (parabool) erinevad. See jääb kehtima ka Lorentzi teisenduste korral, mõningase parandusega. Nimelt tuleb nüüd kauguste mõõtmise korral hakata ka aega mõõtma. Ja vahet tuleb teha suhtelistel ja mittesuhtelistel sündmustel.

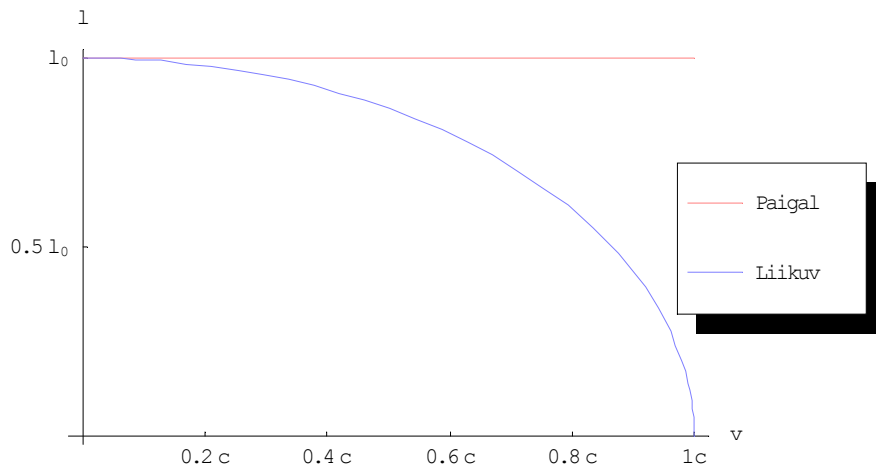
Mittesuhtelised, ntx liikumisega risti olevate asjade pikkus ei muutu. Kaugused paigalolevas ja liikuvast ITS- samad. Küll aga muutuvad piki liikumissuunda mõõdetavate objektide pikkused.

Olgu meil mõõdupuu, pikkusega 2 m. Liigub vaatlejaga, kes paikneb selle keskel kaasa, asetseb risti liikumise suunaga. Mõlemas otsas valgusallikad. Kui nüüd valgusallikad sähvatavad hetkeks, registreerib keskel olev vaatleja mõlemast suunast saabunud valgussähvatuse samaaegselt. Tema jaoks on need samaaegsed sündmused. Olgu meil nüüd samasugune mõõdupuu, aga paikneb liikumise sihis, ei liigu kaasa vaatlejaga kaasa ka. Siis liikumise suunas olevast valgusallikast saabub vaatlejani valguskiir varem kui tagumisest otsast tulev sähvatus. Enam ei ole need kaks sündmust samaaegsed. Samaaegsed oleksid nad vaid selle jaoks, kes on seotud mõõdupuuga (ja paikneb selle keskel).

Relatiivsest kinemaatikast, sündmuste samaaegsuse ja samapaiksuse relatiivsusest tulenevad kaks järgmist järeldust: (tuletuskäiku võib vaadata ka suvalisest gümnaasiumiõpikust):

Liikumise sihis paistavad liikuvad asjad lühemad paigalseisjale lühemad. Kui paigalseisvas taustsüsteemis on pikkus l_0 (omapikkus), siis selle suhtes kiirusega v

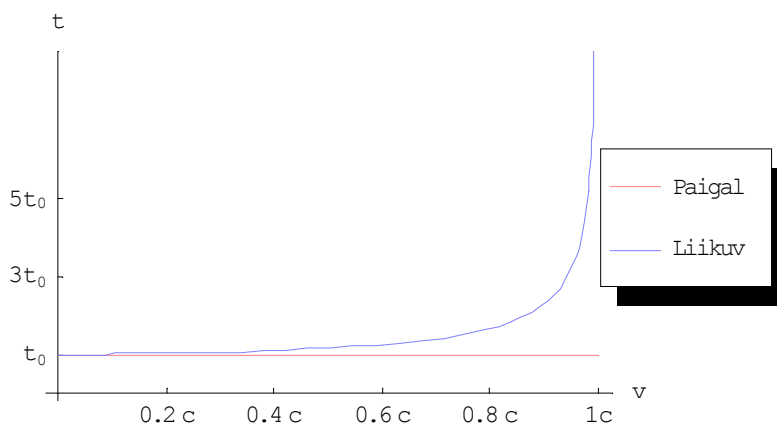
liikuvale on see $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. (Nimetatakse ka pikkuste kontraktsiooniks).



Joonis 2. Keha pikkuse sõltuvus kiirusest mõõdetuna paigalseisvas ja liikuvas ITS-s.

Ka kahe sündmuse vaheline ajavahemik muutub. Minimaalne on see paigaloleva vaatleja jaoks - paigalolevad kellad käivad kõige kiiremini. Aega, mis mõõdetakse paigalolevas ITS-s, nimetatakse omaajaks.

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



Joonis 3. Ajavahemiku sõltuvus liikumiskiirusest. Ajavahemik mõõdetuna paigalseisvas ITS on t_0 , liikuvast t .

Näide. – kui astronaut sõidab siit tähe Proxima Centauri suunas. See täht asub meist 4,23 va kaugusel, st umbes $4 \cdot 10^{13}$ km (lähim täht). Oletame, et see kiirus on konstantne, siis on meil tegemist ITS-dega. Liikudes kiirusega $0,1c$, siis jõuab ta kohale 42,1 aastaga, meil kulunud 42,3 aastat. Kiirusel $0,5c$ – 7,32 aastat, meil 8,46 aastat kulunud. Kiirusega $0,8c$ liikudes kulub astronautil 3,17 aastat, meil 5,28 aastat. Liikudes kiirusega c (siis peaks olema tegemist massita astronautiga), kulub meil 4,23 aastaga, samal ajal astronautil 0.

Kaksikute paradoks – kaks venda, üks jääb Maale, teine läheb kosmosereisile, tuleb sealt tagasi, Maal olnud venna bioloogiline kell käib üsna kiiresti, kosmosereisilt tulnud oma aeglasemalt. Jõuab siia tagasi, siis peaks ta noorem olema. Teisalt – kosmonaudi jaoks oleme hoopis meie tema suhtes liikunud kogu aeg mingi kiirusega

ja seega peaks Maale jäänud vend olema temast noorem. Mingi vastuolu ju. Tegelikult mitte. Asi on selles, et need taustsüsteemid pole kogu aeg inertsiaalsed. Et vennad oma vanuseid saaksid võrrelda, peaksid nad kohtuma. Selleks peaks kosmonaut oma raketi vahepeal pidurdama ja siis uuesti Maa suunas kiirendama. See aga tähendab, et noorenemise efekt läheb tühja. Mis juhtub kiirendusega liikumise hetkel, see siit otse välja ei paista.

Kus ERT-efektid ikkagi silma paistavad. Näiteks lühikese elueaga osakesed. Müüonid, eluiga umbes 10^{-6} s. Mõõdame Maa peal asuvates kiirendites osakeste eluiga, st millise aja pärast nad keskmiselt lagunevad. Kosmilise kiirguse uurimisel on aga teada, et needsamad osakesed võivad jõuda maapinnani. Kus nad tekivad ja kuidas nad siia jõuavad? Oletame, et see osake liiguks valguse kiirusega. Siis oma eluea jooksul jõuaks ta läbida lõpmata pika vahemaa. Aga nii suur see olla ei saa, kui osakesel on mass. Osakesed tekivad suure energiaga kosmilise kiirguse ja atmosfääri ülakihtides oleva gaasi põrgetel (allpool ei saa kindlasti tekkida, sest suure energiaga kosmiline kiirgus alla ei jõua, kuid väikese kiirusega prootonid ei suuda selliseid osakesi põrgetel aatomituumadega tekitada). Liikudes valguse kiirusega lähedasel kiirusel on nende eluiga nende omas ITS-s 10^{-6} s, aga meie maapealne labor liigub nende jaoks suure kiirusega ja meie jaoks toimub selle vidina vananemine tavalisest aeglasemalt. Kosmilise kiirguse uurimisel on teada kosmilise kiirguse komponentide tihedus atmosfääri ülaosas. On teada, millised protsessid (kvantfüüsika protsessid – uute osakeste teke ‘vanade’ põrkumisel aatomituumadega) toimuvad, milline on näiteks müüonite tihedus. Teada on ka nende osakeste tihedus Maa peal. Teades sellistes protsessides osalevate osakeste iseloomulikku energiat, nende kiirust (mõõtmised kiirendites – lõksustame nad magnetvälja ja uurime nende eluiga), saame leida aja meie ITS-s, mis kulus maale jõudmisel. Osutub, et tõepoolest, aja dilatsioon kehtib.

See oli kinemaatika kohta, st vaid liikumine ja liikumisega seonduv. Edasi dünaamika juurde. Dünaamikas on olulised suurused mass ja jõud (ka energia ja impulss tegelikult).

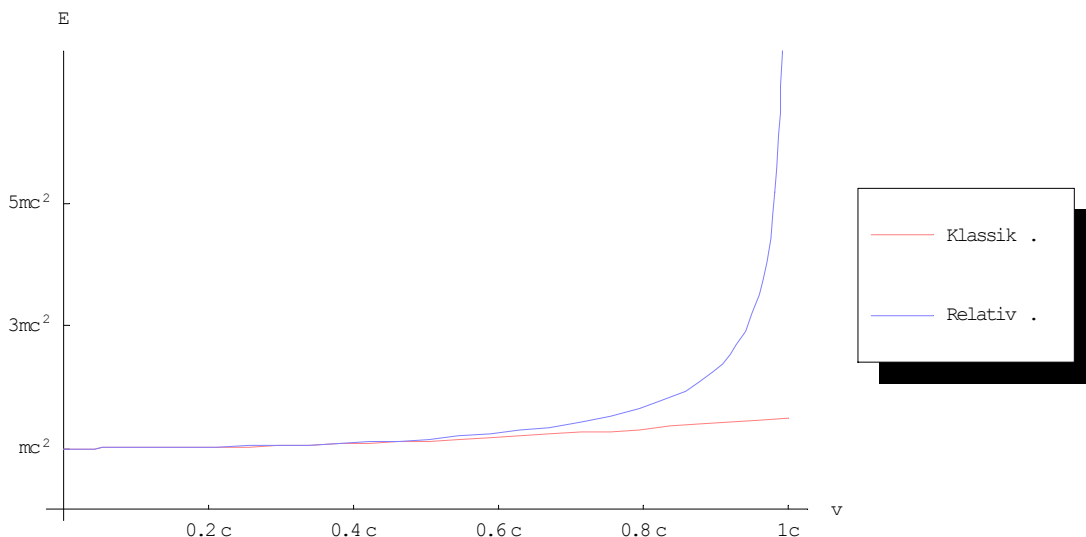
Mass: $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. Klassikalise füüsika kohaselt keha mass ei muutu, kuid ERT-I

järgi kasvab. Seetõttu ka kehade, osakeste kiirendamiseks kuluv energia kasvab.

Klassikalises füüsikas keha kineetiline energia on $E = \frac{mv^2}{2}$, koguenergia seega

$E_{kl} = mc^2 + \frac{mv^2}{2}$. Selleks, et suurendada keha kiirust 2 korda, peab talle antav energia suurenema 4 korda. Et tõsta kiirust 3 korda, siis 9 korda jne. Kuid ERT-s

$$E_{rel} = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



Joonis 4. Keha energia sõltuvus kiirusest klassikalisel ja relativistlikul juhul.

Seega, klassikalisel juhul iseloomustab keha energia seost tema kiirusega parabool, kuid relativistlikul pigem hüperbool. Ühtlasi ilmneb ka, et kui kiirus v läheneb valguse kiirusele, siis läheb energia lõpmata suureks. Sellist energiat pole kusagilt võtta. Järelikult pole ühtegi nullist erineva seisumassiga keha võimalik kiirendada valguse kiiruseni. (ERT põhjal, meie teadaolevate füüsika- ja looduseaduste põhjal). Aga asjaolu, et mikroosakesed võivad omandada täiesti tajutava energia, see on teada kiirenditest ja veelgi paremini kosmilisest kiirgusest. Kosmiline kiirgus – elektronide, alfa-osakeste, prootonite, neutronite, teiste suure energiaga osakeste kogum. Kosmosetehnika ja Päikesetuul, gaasipursked. Maad mõjutavad kahte moodi: 1) see on laetud osakeste kogum, liigub suure kiirusega. Kuid – laetud osakeste liikumine, see ongi elektrivool, mille ümber tekib alati magnetväli. Maa magnetväli küll hälvitab kosmilise kiirguse teelt, st maapinnani enam osakesi ei jõua, sellegipoolest häirib see magnetväli Maa magnetvälja. Veelgi enam – pooluste lähedal jõuavad need osaksed ka Maale lähemale, nt Kanada elektrikatkestuse põhjus (mõned aastad tagasi) oli just see, et nende osakeste (muutuv) magnetväli tekitas pikkades elektrijuhtmetes lisavoolu, kokuvõttes läks voolutugevus liiga suureks ja alajaamad ei pidanud koormusele vastu. 2) osakeste otsene mõju kosmosetehnikale – kahjustused integraalskeemides, teistes väikestes vidinates.

Erirelatiivsusteooria rakendusi, kus kasutatakse?

Kus ei peaks relatiivsusteooriat arvestama? Nn klassikalisel piirjuhul, st kui on tegemist väikeste kiirustega. Näiteks igapäeva elus liikumine, dünaamika, see allub kõik klassikalise mehaanika, klassikalise füüsika reeglitele. Kuigi Maa liigub ümber Päikese kiirusega 30 km/s (s.o 0,1% valguse kiirusest), pole siin mingit mõtet ERT-i kasutada. Kasutamiskohtadest – mainitud sai eelkõige elektromagnetism. Raadiolainete levimine, mikrolainete kasutamine on juba nõ vaikimisi relativistlik füüsika. (Kuigi mitte relativistlik mehaanika). Aga relativistlike efekte tuleb arvestada astronoomias ja astrofüüsikas. Samuti ka vaakumi uurimisel, kvantfüüsikas. Arvestades Einsteini valemit – $E=mc^2$, võime öelda, et nii nagu iga paigalseisev osake tänu sellele valemile omab energiat, nii ka puhtast kiirgusest, (fotonite mass on 0) võime saada reaalseid, massiga osakesi.

Näide - kahe footoni kokkupõrge. Mõlema energiad $E=hf$, kus h on Plancki konstant ja f kiirguse sagedus. Kui footonite koguergia ületab positroni ja elektroni seisuenergiate summa, siis võib kahe footoni kokkupõrkel tekkida positroni elektroni paar. Ka seda on jälgitud, kuid selleks peab energiatihedus (footonite arv ruumalaühikus) olema vägagi suur. Footonid ei kipu just eriti sageli üksteisega põrkuma. Tõenäolisem on vastupidine – positroni ja elektroni kokkupõrkel need osakesed annihileeruvad ja tekib kaks footonit – puhas energia.

Veel rakendusi. Doppleri efekt ja selle rakendamine. Doppleri efekt klassikalises füüsikas – meile lähenevate heliallikate heli on kõrgem kui eemalduvate oma – eemalduvate lainepikkus on seega suurem. Relativistlik Doppleri efekt.

Kasutusala – tähtede eemaldumis- (või lähenemis) kiiruse leidmine. Päikesest eemalepaisatava aine kiiruse leidmine (plasma kiirgab, lainepikkus muutub). Asteroidide kiiruse leidmine. (Juhul, kui laserikiirega pihta saab, siis peegeldunud kiire lainepikkus erineb algse kiire omast). Ka Veenuse pöörlemine ümber oma telje tehti kindlaks just laserikiire peegeldumise abil – ühest ja teisest servast peegeldunud kiirte lainepikkused erinesid, üks oli lühenenud pisut pikemaks (see serv eemaldus meist), teine lühemaks – serv lähenes meile). Praegusel ajal leitakse selle järgi ka teisi päikesesüsteeme, milles võivad leiduda planeedid. Teatavasti tiirlevad päikesesüsteemis kõik kehad ümber ühise masskeskme. Kuivõrd Päikese mass moodustab suure-suure enamuse kogu süsteemi massist, siis paikneb selle süsteemi kese Päikese sees ja võiks öelda, et Päikese kese vaid nihutab end natuke ümber selle keskme. Aga ta siiski liigub. Ja just tänu sellisele liikumisele – võnkumine ümber masskeskme on leitud viimasel paaril aastal mitugi tõenäolist süsteemi, kus on olemas üks või mitu planeeti – ka antud juhul, kui täht eemaldub meist, tema poolt kiiratava kiirguse lainepikkus suureneb, siia poole tagasi võnkudes väheneb. Imetillukesed efektid, aga tänapäevase mõõtetehnoloogia ja andmetöötluse abil avastatavad. Vähemalt ühe puhul on see planeet ka teiste meetoditega leitud. Muidu ei usukski, et see efekt võib just planeedi liikumisest tingitud olla. Planeedi liikumine 100m sinna poole või tagasi – mis efekt see ka on?

Kiirendid. Nende ehitus. Nende kasutamine.

Mida kiirendites mõõdetakse? Ja kuidas? Tüüpilises tuumafüüsika või osakestefüüsika eksperimendis võime reaktsiooni kirjeldada järgmiselt. Osakeste x kiir (punt, hulk) suunatakse tuumadele X . Selles reaktsioonis lendab minema osake (osakesed) y , jättes järele tuuma Y . St: $x + X \rightarrow y + Y$.

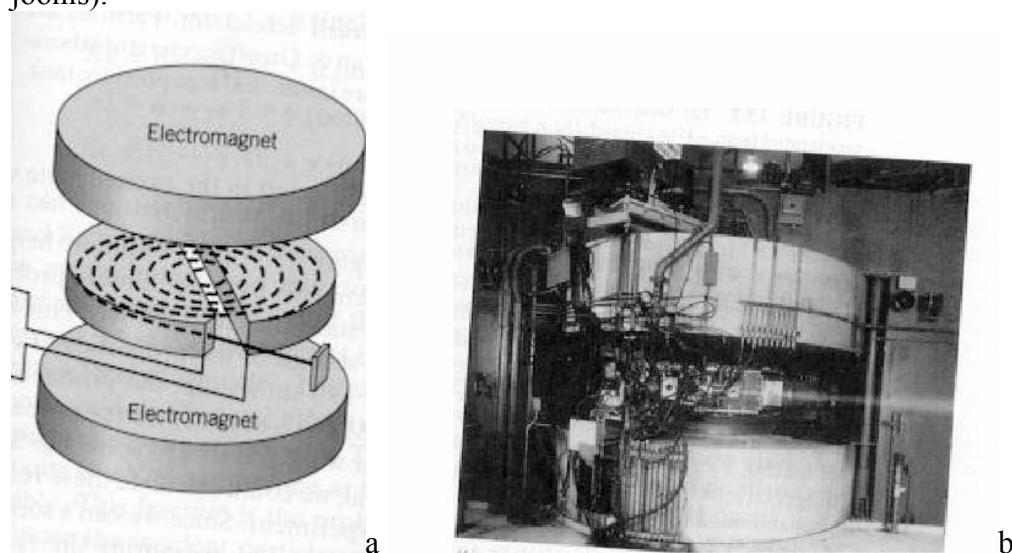
Näide tuumafüüsikast. Deuteeriumi tuumadega vase isotoobi pommitamisel 'eraldus' neutron. Milline tuum jäi pärast sellist reaktsiooni alles? Vastus: $H_1^2 + Cu_{29}^{63} \rightarrow n_0^1 + Zn_{30}^{64}$. Sarnaselt keemilistele reaktsioonidele peavad ka siin tuumalaengut näitavad arvud ning nukleonide arve näitavad arvud mõlemal pool võrrandit klappima. Raskemate tuumade pommitamisel kergete osakestega jälgitakse tavaliselt eemalelendavaid kergete osakesi. Raske tuum kaotab oma kinetilise energia ja jääb paigale.

Kiirenditega mõõtmiste teostamisel mõõdetakse osakese y juures peamiselt kahte suurust – energiat ning tõenäosust, et ta mingi konkreetse energia korral mingi nurga all oma esialgse suunaga võrreldes, minema lendaks. Kuivõrd kiirendite korral on tegemist mitte kahe osakese x ja X reaktsiooniga, vaid mõlemat tüüpi osakesi on palju, siis räägitaksegi tõenäosustest. Kvantmehaanikast on teada, et näiteks elektroni impulss (kiirusega võrdeline) ja asukoht pole korraga päris täpselt määratud. Sama

kehtib ka raskema tuuma korral. Nii aatomituuma (siht, X) kui ka kiiritava osakeste kimbu x iga osakest võime vaadelda 'tõenäosuspilvena'. Seoses sellega räägitakse ka nn. protsessidele iseloomulikest reaktsiooni ristlõikepindaladest. Millisele pindalale pihta saades on tõenäolisemad ühesugused või teistsugused protsessid erinevate kineetiliste energiatega korral. $1 \text{ barn} = 1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$. Näiteks:

$I+n \rightarrow I+n$ (kui $\sigma=4\text{b}$). $I+n \rightarrow I+\gamma$ (kui $\sigma=7\text{b}$ - neutronhaare), $Xe+n \rightarrow Xe+n$ (kui $\sigma=4\text{b}$ - mitteelastne põrge), $Xe+n \rightarrow Xe+\gamma$ (kui $\sigma=10^6\text{b}$ - neutrohaare).

Sellist tüüpi protsesside uuringuks on kasutatud tsüklotrone. Tööpõhimõte: (vt joonis).



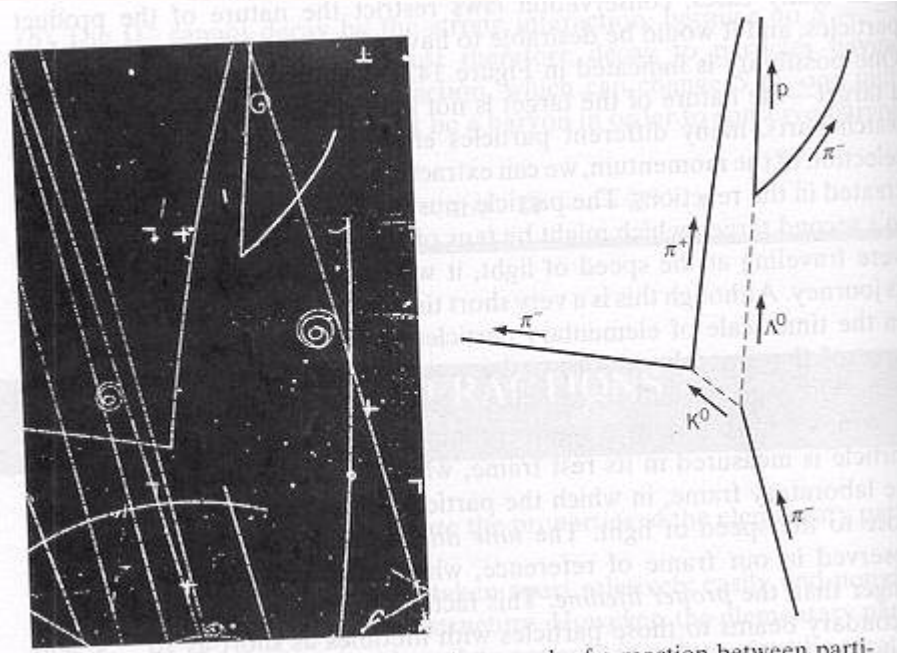
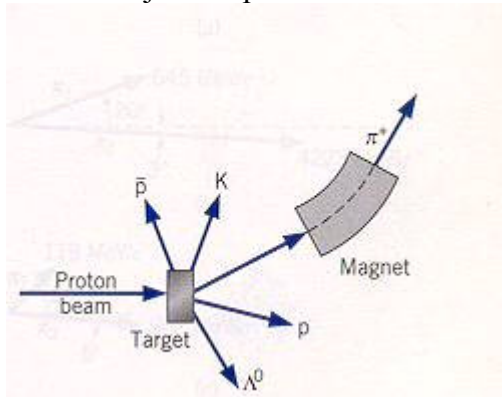
Joonis5. Tsüklotroni tööpõhimõte ja välisvaade.

Magnetväli hoiab laetud osakesi ringikujulisel orbiidil. Iga kord, kui osakesed ületavad lõhe, saavad nad elektrivälja poolt juurde väikese kiirenduse. Selliselt võib osake teha kuni 100 tiiru, energia kasvab 10-20 MeV-ni. (energia, mille omandaks elektron läbides potentsiaalide vahe ehk pinge 10-20 miljonit volti). Kuid antud seade on suhteliselt kompaktne. Lisaks sellele – magnetvälja abil saame osakeste kimpu suhteliselt lihtsalt suunata.

Tsüklotronide abil on leitud enamus uusi elemente – raskete tuumade pommitamine laetud osakestega. Selleks, et avastada mikromaailma uusi komponente, kasutatakse teistsuguseid kiirendeid – selliseid, kus kaks põrkuvad suhteliselt kerged ja stabiilsed osakesed. (elektron-positron, elektron-elektron, prooton-prooton, prooton-antiprooton). Neis kiirendites kiirendatakse laetud osakesi piki suurt ringi.

Kvanitelektrodünaamika üks rajajaid Richard Feynman võrdles osakeste põrkumise protsessi (oma hinna poolest näiteks), et see on nagu võtaks kaks kallist Šveitsi kella, virutaks nad teineteise vastu ja vaataks, mis välja tuleb. Osakeste suur stabiilsus on nõutav selleks, et selle kiirendamise aja jooksul ära ei laguneks. Sel eesmärgil oleks loogiline valik elektronid või prootonid. Prootonid on natuke parem valik. Sihtmärk peaks samuti olema stabiilne. Et see oleks ka võimalikult suure tihedusega, oleks parem valik vedel (!) vesinik – vesiniku tuumadeks teatavasti prootonid. Nagu ka Feynmani Šveitsi kellade näites, võib eemale lennata mitmeid erinevaid osakesi. Algosakeste ning nende kiiruste ja suuna sobiva valikuga, saab luua uusi mittestabiilseid osakesi (eluga suurusjärgus 10^{-7} s), mis jõuaks enne lagunemist detektorisse, mis võib asuda umbes 10 m kaugusel. Samuti, näiteks magneti abil

saame eristada soovitavaid sekundaarseid osakesi ning need uue sihtmärgi pihta suunata. Kuigi nende eluiga võib olla väike, tänu relativistlikule aja dilatatsioonile nad jõuavad sinnani, et tekitada uus reaktsioon. Selleks, et detekteerida, millised osakesed võivad olla tekkinud, kasutatakse mitmeid erinevaid meetodeid. Energiate järgi. Näiteks juba klassikaline meetod – mullikambris – mullikamber on täidetud veeldatud vesinikuga, suure energiaga laetud osake tekitab selles ionisatsiooni, selliseid asju saab pildistada.



Tsüklotron. Positron-elektron-kiirendid. CERN, Fermilab.

Kasutamine.

Selliseid kiirendeid kasutatakse ka natuke sekundaarsemal eesmärgil. Meditsiin.

Üldrelatiivsusteooria.

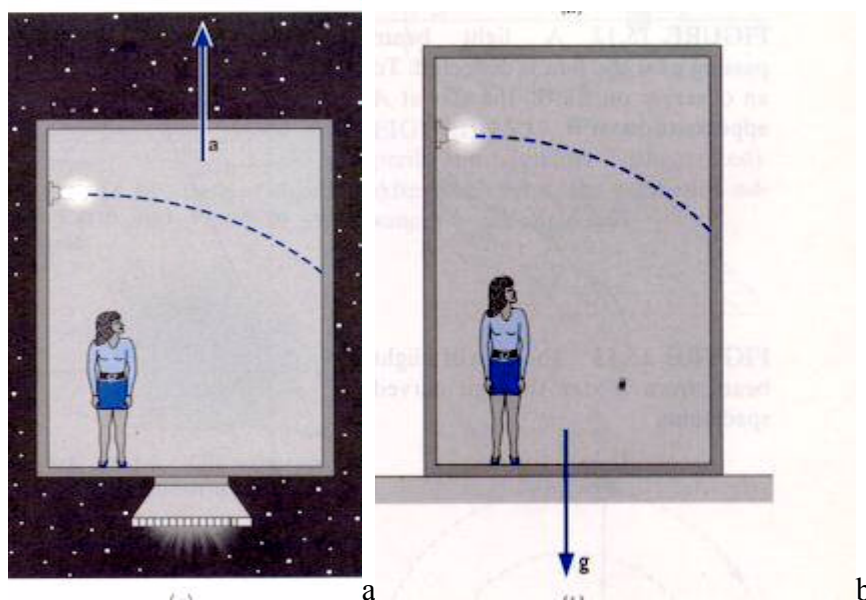
Mis on ÜRT-s erilist ja kus see veel rakendamist leiab, kõlbab, mis on tema järeldused? Erinevad ERT-st?

Üldrelatiivsusteooria alustalaks on ekvivalentsprintsipi järgmises sõnastuses: ei eksisteeri lokaalset eksperimenti, mille abil saaks teha vahet mittekiirenevas inertsiaalses taustsüsteemis paikneva ühtlase gravitatsioonivälja ning ühtlaselt kiireneva (mitteinertsiaalne) taustsüsteemi efektide vahel.

Klassikaline näide. Olgu meil tegemist suletud liftiga. Ühel juhul langeb lift vabalt Maa gravitatsiooniväljas (liftitross läks katki) – mida teeb lift? Langeb vaba langemise kiirendusega 9.81m/s^2 . Mida teeb selles olev inimene? Vastu pörandat surutud pole, vastu lage samuti mitte – hõljub vabalt (kaaluta olek). Nii ka kõik teised asjad, mis liftis paiknevad. Olgu meil seesama lift sellesama inimesega kosmoses. Ka seal valitseb kaalutus. Kui lift on suletud, aknaid pole, ei saa mitte kuidagi teha kindlaks, kas me paikneme avakosmoses või langeme Maa peal. Veelgi enam – ka ühegi katsega selles lokaalses ruumis (liftis) ei saa me seda näidata.

Samamoodi võime vaadata ilma akendeta lifti või raketti, mis ühel juhul paikneb maapinnal. Inimesele seal mõjub raskusjõud $F=mg$. Kui seesama lift avakosmoses liiguks kiirendusega g (näiteks Päikese suhtes, kiirendaks end siit süsteemist välja), siis mõjub inimesel selles jõud $F=mg$. Ja samamoodi – kinnises, suletud raketis ei saa öelda, kas on tegemist gravitatsioonivälja mõjuga, mis meid surub vastu raketi põhja või liigub see kiirendusega avakosmoses. Erinevuse saab kindlaks teha alles siis, kui saame liikumist võrrelda ülejäänud kosmoseruumiga. St, me saame selle kindlaks teha globaalsete mõõtmiste abil. (Tegelikult on sel ka teine formuleering kasutades inertsiaalset ja gravitatsioonilist massi).

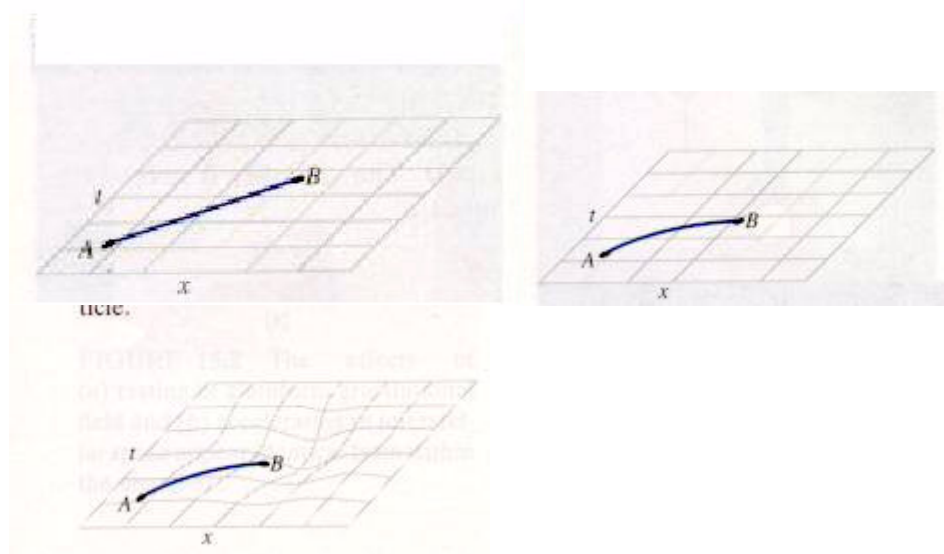
Relatiivsusteoorias kasutasime kogu aeg inertsiaalseid taustsüsteeme, mis on ERT raames kõik võrdväärsed. Tundus, et kiirendusega liikuv TS on eelistatum. ÜRT raames enam mitte. Ekvivalentsusprintsipi võtab selle eelistuse ära. Pole vahet, kas on tegemist inertsiaalse TS-iga gravitatsiooniväljas või kiirendusega liikuva TS-ga. Efektid peavad olema sarnased.



Vaatleme näiteks valguskiirt ühtlase kiirusega liikuvast raketis. Valguskiir on suunatud liikumisega risti. Selles raketis valguskiir liigub sirgelt, kuid vastasseina tabab pisut allpool kui paigaloleku puhul. See kehtib ka erirelativistlikul juhul. Tegemist on ITS-ga, nii raketis kui ka sellest väljaspool asuvad vaatlejad on samal nõul. Kuid kui rakett liigub kiirendusega, siis valguskiir kõverdub – tabab vastasseina allpool ühtlase kiirusega liikumise näidet. (vt joonis). Ekvivalentsusprintsipi kohaselt peab sama

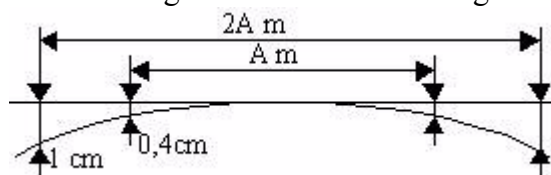
juhtuma ka siis, kui rakett on paigal, kuid paikneb gravitatsiooniväljas, näiteks Maa peal. Efekt peaks olema küll tilluke, kuid mõõdetav. Oluline – valguskiir võib kõverduda gravitatsiooniväljas.

Sellest ekvivalentsprintsibiist tulenev matemaatika (või – Lorentzi matemaatika üldistus) sunnib aega ja ruumi vaatlema koos. Kiirendus hakkab koordinaate ja ruumi geomeetriat üheks siduma. Näited (joonised 15.5 – 15.7). Esimesel joonisel on toodud koordinaatteljed, ühel teljel ruumikoordinaat x , teisel aeg. Ühtlase kiirusega liikumine on kujutatud joonisel a. Kui tegemist on kiirendusega liikumisega, siis on trajektooriks parabool – joonis b. Joonisel c on toodud juhtum, mis juhtub, kui keha liigub ühtlase kiirusega, kuid gravitatsiooniväljas – aega ja ruumi kujutav pind on välja venitatud, sirge kõverdub.



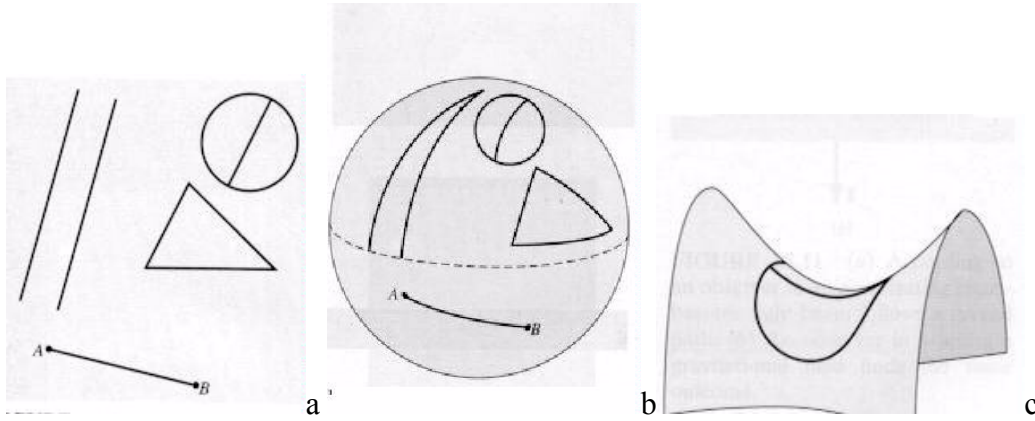
Vaatame lähemalt, mida kujutab endast kõver ruum.

Auditooriumi põrand on tasane (mingi mõõtmistäpsuse korral). Me võime kasutada siin kõverjoonelisi koordinaatsüsteeme, aga ruum ise on tasane. Maa? Tegelikult võime nii väita, et mingis lähenduses, mingis piirkonnas me võime Maa pinna lugeda tasaseks. Tegelikult teeme me nii nagunii.



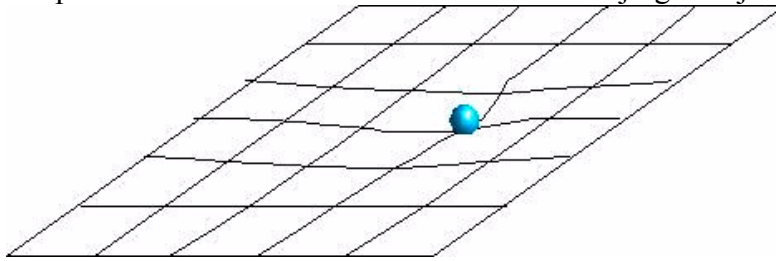
Olgu meil mõõtmistäpsus 1 cm. Siis võime piirkonna A lugeda tasaseks – mõõtmisvahendid ei võimalda tema kumerust tuvastada või on see kumerus ebaoluline. Piirkond $2A$ on aga selles lähenduses kumer.

Kahemõõtmelises ruumis võib tuua näitena palli pinna, see on kumer (positiivne kumerus). Palli pinnal ei kehti eukleidiline geomeetria – 2 paralleelset sirget (meridiaanid) lõikuvad ja mitte lõpmatutes. Allpool toodud joonistel on näha mitmed geomeetriselised objektid tasasel pinnal (a), positiivse kumerusega pinnal – keral (b) ning negatiivse kumerusega, nn sadulpinnal (c).



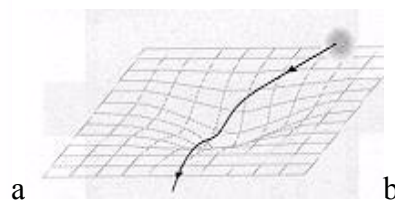
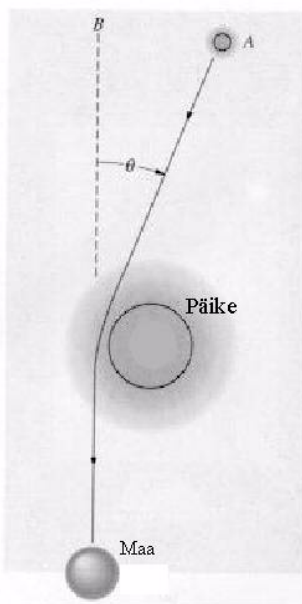
Sellist matemaatikat, mis kirjeldab objekte, nende suurusi, omadusi mittetasastel ruumidel, nimetatakse mitte-eukleidiliseks geometriaks. Kuid iga punkti väikeses ümbruses võime rääkida tasasest ruumist, tasasest 2-pinnast. Taas, see sõltub mõõtmistäpsusest või meie vajadustest, kas hakkame arvestama, et 20x20m on piisavalt tasane või 10x10 km.

2D-pinna kõverdumist massi tõttu võib vaadata järgmise joonise järgi:



Sarnaselt võib ka 3D-ruum olla kõver. Ruumi kõverus on seda suurem, mida suurem on massi või energia tihedus.

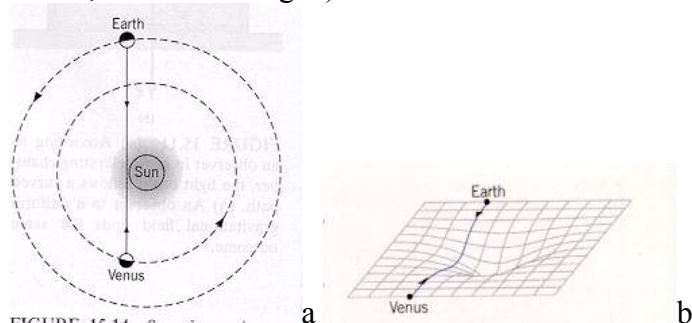
Kus ruumi kõverus ilmneb – valguskiire kõrvalekaldumine suure gravitatsioonivälja läheduses.



Tähelt A tulnud valguskiir kaldub Päikese juures Päikese poole. Tänu sellele näeme me nagu tuleks valgus tähelt B. Kõrvalekalde nurk θ sõltub Päikese massist ja vähimast kaugusest valguskiir ning Päikese massikeske vahel. Teisisõnu – mida kõveramast ruumiosast valguskiir läbi läheb, seda rohkem kõverdub.

Esimest korda mõõdeti valguskiire kõverdumist Aafrikas ja Lõuna-Ameerikas pildistades taevast (Päikese piirkonda) päikesevarjutuse ajal. Tol ajal leidis efekti olemasolu kinnitust, katse täpsus oli 10-20%. Viimaste aastate uuringud kvasarite mõõtmisel on andnud valguskiire kõrvalekalde mõõdetud ja ÜRT poolt ennustatava tulemuse erinevuse 2% täpsusega.

Teine ÜRT poolt ennustatud efekt, mida on mõõdetud, on valguskiire hiline mine gravitatsiooniläätse läheduses (tänu ruumi väljavenitatusele läbiks valguskiir nagu pikema tee). Selleks katseks on mõõdetud Veenuselt peegeldunud radarikiire hiline mist. Radarikiir hilines 10^{-4} sekundi võrra võrreldes tavalise, tasase ruumiga. Ka siin on mõõtmise ning teooria erinevus mõne protsendi piires. (Veenuse pind pole tasane, näiteks see segab).



Mõõdetud on veel Merkuuri periheeli nihet.

Viimaseks katseks, mis kinnitab ÜRT-d on gravitatsioonilainete olemasolu. ÜRT ennustuste kohaselt kiirgab gravitatsiooniliselt seotud süsteem, näiteks Maa-Päike või Maa-Kuu gravitatsioonilaineid, mis kannavad süsteemist ära energiat. Tänu sellele energiakaole peavad süsteemis olevad objektid teineteisele lähenema ning tiirlemisperiood vähenema. Tegelikult, kuivõrd Maa asub Päikesest üsna kaugel, on see efekt tõeliselt väike. Sellist efekti – tiirlemisperioodi vähenemist on mõõdetud lähestikku tiirlevate kaksiktähtede puhul. Üks esimesi – Taylori ja Hulse poolt mõõdetud, pikaajaliste vaatluste tulemusena, 1970.ndate alguses, kaksiktähed olid peaaegu võrdse massiga, umbes 1,41 Päikese massi, nende vaheline kaugus umbes 4,5-5 korda suurem Maa ja Kuu vahelisest kaugusest. Tiirlemisperiood 27900 s, st umbes kolmandik ööpäevast. $dT/dt = -2,4 \cdot 10^{-12}$. Erinevus mõõdetud ja ennustatud tulemuse vahel on alla 1%.

Viimastel aastatel on üritatud ka gravitatsioonilaineid otseselt mõõta. Selleks on kaks meetodit. Üks seotud interferomeetritega.

Gravitatsiooniläätse. Kuidas teha kindlaks, et tegemist on sama objektiga? Merkuuri periheeli nihe. Gravitatsioonilained. (seni mitte mõõdetud). GÜroskoobi pretsessioon. Gravitatsioonilainete detektorid. Universum? See jääb järgmiseks korraks.